Environnement Canada
Conservation et Protection

Environment Canada
Conservation and Protection

collection
ENVIROGUIDE

MANUEL D'INTRODUCTION

Canada

octobre 1986

87-01877/

COLLECTION "ENVIROGUIDE"

La collection "Enviroguide" est constituée de guides d'information technique à utiliser en cas de déversements de matières dangereuses. Chaque guide fournit une masse considérable d'information relative au produit chimique dont il traite. L'information ainsi présentée a pour but d'aider l'utilisateur à mettre sur pied un plan d'intervention en cas d'accident et à évaluer les incidences sur l'environnement que peut avoir tel ou tel polluant. Le contenu de chacun des guides a été vérifié par la Direction des services techniques du Service de la protection de l'environnement avant que ne soit autorisée sa publication. Il est à noter qu'une telle autorisation n'implique pas que le contenu des guides reflète les points de vue ou la politique du Service de la protection de l'environnement. De même, le fait de mentionner des marques déposées ou des noms de produits commerciaux ne doit pas être interprété comme une forme de recommandation.

LISTE DES PRODUITS FAISANT L'OBJET D'UN ENVIROGUIDE

Acide acétique. Acide nitrique. Acide phosphorique. Acide sulfurique (et oléum). Ammoniac. Anhydride acétique. Anhydride sulfureux. Benzène. Butyraldéhydes. Chlorate de sodium. Chlore. Chlorure d'hydrogène/acide chlorhydrique. Chlorure de calcium. Chlorure de potassium (potasse). Chlorure de sodium. Chlorure de vinyle Chlorure de ferrique. Cyclohexane. Dichloro-1, 2 éthane (chlorure d'éthylène). Dioxyde de carbone. Dioxyde de soufre. Éthylbenzène. Éthyl-2 hexanol. Éthylène. Éthylèneglycol. Fluorure d'hydrogène/acide fluorhydrique. Formaldéhyde. Gaz naturel, Hydroxyde de sodium. Hypochlorite de sodium. Mercure. Méthanol. Morpholine. Naphta. Nitrate d'ammonium. Oxyde d'éthylène. Oxyde de propylène. Oxyde/hydroxyde de calcium. Phénol. Phosphate d'ammonium. Phosphore. Plomb tétraéthyle. Polychlorobiphényles (PCB). Propylène. Soufre. Styrène (monomère). Sulfate de sodium. Sulfate de zinc. Sulfure d'hydrogène. Toluène. Urée. Xylènes.

collection
ENVIROGUIDE

MANUEL D'INTRODUCTION

CONSERVATION ET PROTECTION

DIRECTION GÉNÉRALE DES PROGRAMMES
DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

DIRECTION DU DÉVELOPPEMENT
DE LA TECHNOLOGIE ET
DES SERVICES TECHNIQUES

OTTAWA
OCTOBRE 1986
ENVIRONNEMENT CANADA

Publication
distribuée par la Section des publications
Conservation et Protection
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0E7

Édition française de
Introduction Manual
préparée par le Module d'édition française

English copy available at the above mentioned address

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986

N° de cat. En48-10/01-1986F

ISBN 0-662-94034-2

AVANT-PROPOS

La collection "Enviroguide" a été lancée officiellement en 1983. Elle est constituée de guides d'information technique sur les produits chimiques qui sont les plus souvent en cause dans les cas de déversements accidentels au Canada. Les guides, qui s'adressent à des spécialistes dans le domaine des déversements, sont conçus pour faciliter la préparation des plans d'intervention et l'évaluation des incidences sur l'environnement.

Vu la grande quantité d'information présentée et le caractère très technique des guides, ces derniers ne s'adressent pas au personnel de première intervention, pour qui existent déjà des manuels plus appropriés.

L'information offerte provient en grande partie d'une enquête bibliographique et les auteurs ont pris soin, aussi bien au stade de la compilation qu'à celui de la révision, de vérifier la justesse des éléments retenus. À noter qu'il ne faut pas voir dans la publication de ces éléments d'information une forme de recommandation de la part du gouvernement canadien ni de quelque autre groupe.

REMERCIEMENTS

La version définitive du présent manuel est l'oeuvre du personnel du Service de la protection de l'environnement, qui a procédé à la refonte de nombreux passages du texte initial, ajouté maints renseignements et commentaires et préparé les schémas et les figures.

Le travail préliminaire avait été donné à contrat par Environnement Canada aux firmes M.M. Dillon Consulting Engineers and Planners, Concord Scientific Corporation et Waterloo Engineering Limited.

L'abondance de détails qu'on trouve dans le guide est le fruit de la collaboration de plusieurs personnes, organismes et institutions qui ont fourni des données et des conseils précieux, au stade de la compilation comme au stade de la rédaction.

TABLE DES MATIÈRES

	Avant-propos	III
	Remerciements	III
	Liste des figures	VII
	Liste des tableaux	VIII
	Introduction	1
1	**Résumé**	3
1.1	Aperçu et objectifs	3
1.2	Choix et présentation des données	3
2	**Propriétés physiques et chimiques**	4
2.1	Aperçu et objectifs	4
2.2	Sources d'information	4
2.3	Cas particuliers de terminologie	4
2.3.1	Données relatives à l'inflammabilité et à la combustion	4
2.3.2	Solubilité	5
2.4	Termes de chimie et de physique	5
2.5	Établissement des diagrammes de phases	11
2.5.1	Introduction générale	11
2.5.2	Méthodes d'estimation des diagrammes de phases	13
2.5.2.1	Estimation de l'équilibre liquide-vapeur	13
2.5.2.2	Estimation de l'équilibre solide-vapeur	14
2.5.2.3	Estimation de l'équilibre solide-liquide	16
3	**Production, transport et commerce**	21
4	**Manutention du produit et compatibilité des matériaux**	22
4.1	Aperçu et objectifs	22
4.2	Sources d'information	22
4.3	Choix et présentation des données	23
5	**Fuite et migration du produit**	24
5.1	Introduction	24
5.2	Nomogrammes des fuites	24
5.2.1	Aperçu et objectifs	24
5.2.2	Sources d'information	25
5.2.3	Choix des données	25
5.2.3.1	Position et diamètre de l'orifice	25
5.2.3.2	Fuite de liquide	25
5.2.3.3	Fuite de gaz	26
5.2.3.4	Relations thermodynamiques	27
5.3	Diffusion dans l'atmosphère	28
5.3.1	Aperçu et objectifs	28
5.3.2	Besoins d'information	29
5.3.3	Modèles de diffusion	31
5.3.3.1	Hypothèses	33
5.3.3.2	Données nécessaires	33
5.3.3.3	Modèle de panache	34
5.3.3.4	Modèle de bouffée	38
5.3.3.5	Largeur du panache ou de la bouffée	39

5.3.4	Nomogrammes de la diffusion des vapeurs	39
5.3.4.1	Débit d'émission des vapeurs en fonction du rayon de la nappe	39
5.3.4.2	Teneur uniformisée en vapeurs en fonction de la distance sous le vent	42
5.3.4.3	Tableaux de la largeur de la zone dangereuse du panache ou de la bouffée	43
5.3.4.4	Distance parcourue par le panache (ou la bouffée) en fonction du temps écoulé	43
5.3.4.5	Nomogrammes de conversion des unités	48
5.3.5	Résumé de la modélisation des émissions	51
5.3.5.1	Marche à suivre dans le cas d'une émission modélisable en tant que panache	51
5.3.5.2	Marche à suivre dans le cas d'une émission modélisable en tant que bouffée	51
5.4	Comportement dans l'eau	52
5.4.1	Aperçu et objectifs	52
5.4.2	Sources d'information	52
5.4.3	Élaboration des modèles et préparation des nomogrammes	53
5.4.3.1	Étalement d'un liquide sur l'eau	53
5.4.3.2	Produit chimique sédimentant	57
5.4.3.3	Mélange et dilution	62
5.4.3.4	Produit chimique volatil	66
5.5	Comportement dans le sol de surface et dans le sous-sol	66
5.5.1	Aperçu et objectifs	66
5.5.2	Sources d'information	68
5.5.3	Développement et présentation des données	69
5.5.3.1	Liquide sous pression	70
5.5.3.2	Liquide non miscible	70
5.5.3.3	Liquide miscible	71
5.5.3.4	Solide	71
5.5.3.5	Rapport	71
6	**Protection de l'environnement**	72
6.1	Aperçu et objectifs	72
6.2	Sources d'information	72
6.3	Choix et présentation des données	73
6.4	Glossaire	73
7	**Protection de la santé**	81
7.1	Aperçu et objectifs	81
7.2	Sources d'information	81
7.3	Glossaire	82
8	**Compatibilité chimique**	86
8.1	Aperçu et objectifs	86
8.2	Sources d'information	86
9	**Mesures d'intervention et de sécurité**	87
9.1	Aperçu et objectifs	87
9.2	Sources d'information	87
9.3	Choix et présentation des données	87
9.3.1	Adsorption sur charbon	87
9.3.2	Mesures de protection	91
10	**Cas concrets de déversements accidentels**	92
10.1	Aperçu et objectifs	92
10.2	Sources d'information	92

11	**Identification et dosage du polluant**	93
11.1	Aperçu et objectifs	93
11.2	Sources d'information et choix des données	93
11.3	Méthodes utilisées pour chaque milieu	93
11.3.1	Air	93
11.3.2	Eau	94
11.3.3	Sol	94
11.4	Glossaire	94
12	**Références bibliographiques**	98
12.1	Références bibliographiques	98
12.2	Choix d'ouvrages en langue française	101

LISTE DES FIGURES

1	Diagramme de phases de l'eau	12
2	Stabilité atmosphérique et gradient vertical de température	30
3	Arbre servant au choix du modèle	32
4	Schéma d'un point source à émission continue	33
5	Aire source à émission continue assimilée à un point source théorique	35
6	Diffusion horizontale σ_y en fonction de la distance sous le vent à partir de la source, pour les six catégories de stabilité de Pasquill	36
7	Diffusion verticale σ_z en fonction de la distance sous le vent à partir de la source, pour les six catégories de stabilité de Pasquill	37
8	Débit d'émission des vapeurs à différentes températures en fonction du rayon de la nappe	41
9	Teneur uniformisée en vapeurs en fonction de la distance sous le vent	44
10	Teneur en vapeurs en fonction de la distance sous le vent	45
11	Schéma de la zone dangereuse pour un vent de 270°	46
12	Schéma de la zone dangereuse pour un vent de 270° ± 10°	46
13	Distance parcourue par le panache en fonction du temps écoulé	47
14	Conversion des unités de la TLV®	49
15	Conversion des unités de la limite inférieure d'inflammabilité	50
16	Courbe d'adsorption sur du charbon	88

LISTE DES TABLEAUX

1	Facteurs K_F pour les composés organiques aliphatiques et alicycliques	15
2	Accroissements volumiques (v_i) pour certains ions et éléments courants	18
3	Catégories de stabilité atmosphérique	42
4	Demi-largeur maximale du panache dangereux de vapeurs d'éthylbenzène (à 20 °C)	48
5	Étalonnement d'un fluide à coefficient de viscosité élevé sur un fluide à coefficient de viscosité faible	54
6	Étalement d'un fluide à coefficient de viscosité faible sur un fluide à coefficient de viscosité élevé	55
7	Rayon maximal de la nappe et temps nécessaire à l'évaporation complète	67

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

adf	Antidéflagrant
atm	Atmosphère
B	Périmètre mouillé
c.f.	Coupelle fermée
c.o.	Coupelle ouverte
CPG	Chromatographie en phase gazeuse
d	Densité
d vap	Densité de vapeur
d.-v.	Demi-vie
D ext.	Diamètre extérieur
D int.	Diamètre intérieur
DAMM	Diamètre aérodynamique moyen en masse
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
D_{ev}	Diamètre d'entrée
DIF	Détecteur d'ionisation à flamme
DMM	Diamètre moyen en masse
DMN	Diamètre moyen en nombre
DMV	Diamètre moyen en volume
DPI	Détecteur à photo-ionisation
D_s	Diamètre de sortie
DL min.*	Dose létale minimale
DL 50*	Dose létale moyenne
DT min.	Dose toxique minimale
et coll.	Et collaborateurs
eV	Électronvolt
f. n. éq.	Fumée normalisée équivalente
g	Accélération de la pesanteur
gal imp.	Gallon impérial
h	Hauteur
IDLH*	*Immediately Dangerous to Life or Health*
IR	Infrarouge
j	Jour
J	Joule
K	Coefficient de perméabilité
K_0	Coefficient de perméabilité d'un sol saturé
k	Coefficient de perméabilité intrinsèque
l	Litre
L.I.E.	Limite inférieure d'explosibilité
L.I.I.	Limite inférieure d'inflammabilité
L.S.E.	Limite supérieure d'explosibilité
L.S.I.	Limite supérieure d'inflammabilité
m	Masse
M	Molaire
MAK*	Teneur maximale admissible
MAK-D*	Teneur maximale admissible
MAK-K*	Teneur maximale admissible - courte durée
max.	Maximum
mé/l	Milliéquivalent par litre
MIK*	Teneur maximale d'immission
min.	Minimum
mn	Minute
M	Masse moléculaire
mol	Mole
MPT	Moyenne pondérée en fonction du temps
N	Newton
N	Normal
Pa . s	Pascal seconde
pds éq.	Poids équivalent
ppb	Parties par milliard (10^{-9})
ppm	Parties par million (10^{-6})
ppt	Parties par mille (10^{-3})
psi	*Pounds per square inch*
P	Pression
P_c	Pression critique
PEL*	*Permissible Exposure Limit*
Po	Poise
Pt cong.	Point de congélation
Pt déf.	Point de déflagration
Pt dét.	Point de détonation
Pt écl.	Point d'éclair
Pt écoul.	Point d'écoulement
Pt liq.	Point de liquéfaction
PVC	Chlorure de polyvinyle
q	Débit
q_e	Débit d'entrée
q_f	Débit de fuite
q_m	Débit-masse
q_s	Débit de sortie
q_v	Débit-volume
R	Constante des gaz parfaits
ρ	Masse volumique
std	Standard
SM	Spectroscopie de masse
St	Stokes
STEL*	*Short Term Exposure Limit*
t	Tonne
t	Temps
T	Température
T_a	Température ambiante
T_b	Point d'ébullition
T_f	Point de fusion
T_c	Température critique
TE 50*	Teneur efficace moyenne
tf	Tonne forte
TI 50*	Teneur inhibitrice moyenne
TLm*	Tolérance moyenne
TL min.*	Teneur létale minimale

TL 50*	Teneur létale moyenne	$u_{rel.}$	Vitesse relative
TLV®*	*Threshold Limit Value*	μ	Viscosité
TLV® -C*	*Threshold Limit Value-Ceiling*	V	Volume
TPN	Température et pression normales	°Bé	Degré Baumé
		°C	Degré Celsius
TT min.*	Teneur toxique minimale	ϕ	Diamètre
u	Vitesse	x	Distance sous le vent
u_l	Vitesse limite de chute	⚒	Ne pas utiliser d'eau comme moyen d'extinction
u_n	Vitesse de sortie		

* Notions expliquées dans la section Définitions.

DÉFINITIONS

Les définitions figurant ci-dessous valent pour la collection "Enviroguide". Le lecteur notera qu'elles n'ont pas toujours une portée générale. Pour plus de détails, ou pour d'autres définitions, se reporter au Manuel d'introduction *Enviroguide*.

Bio-accumulation. - Rétention sans cesse croissante d'une substance dans les tissus d'un organisme tout au long de son existence (le facteur de bioconcentration augmentant sans cesse).

Bio-amplification. - Rétention d'une substance dans les tissus à des teneurs de plus en plus élevées au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie des organismes de la chaîne alimentaire.

Bioconcentration. - Rétention d'une substance dans les tissus d'un organisme au point que la teneur des tissus en cette substance surpasse la teneur du milieu ambiant en cette substance, à un moment donné de la vie de cet organisme.

Concentration. - Comme ce mot a des sens multiples et parfois mal définis selon qu'il s'agit de chimie, de biologie ou d'écologie, on lui a préféré des termes jugés plus précis, tels titre, teneur et bioconcentration.

Contaminant. - Polluant qui figure sur une liste de produits dangereux, établie en vertu de la *Loi sur les contaminants de l'environnement*.

Dose létale minimale. - Dans le cas de la toxicité pour l'homme (la dose définie ici peut être extrapolée à l'homme), il s'agit de la plus faible dose (autre que la DL 50) d'une substance dont l'absorption, excluant l'inhalation, en une ou plusieurs prises, au bout d'un temps donné, a été signalée comme cause de la mort d'un animal ou d'une personne. Abrév. DL min.

Dose létale moyenne (1). - Dans le cas de la toxicité pour l'animal, il s'agit de la dose qui tue, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Abrév. DL 50.

Dose létale moyenne (2). - À des fins de comparaison ou d'extrapolation dans l'étude de la toxicité pour l'homme, il s'agit de la dose (calculée) d'une substance censée entraîner, au bout d'un temps donné, la mort de 50 p. 100 d'une population homogène d'animaux. Elle est déterminée par suite de l'absorption, excluant l'inhalation, d'une quantité de cette substance par un lot statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population. Abrév. DL 50.

Dose toxique minimale. - La plus faible dose d'une substance, introduite par toute autre voie que l'inhalation, pendant quelque période de temps que ce soit, dont l'absorption a été signalée comme cause d'effet toxique chez des personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes. Abrév. DT min.

Facteur de bioconcentration. - Rapport de la teneur en une substance des tissus d'un organisme exposé (moins la teneur d'un organisme témoin) à la teneur en cette substance du milieu ambiant.

IDLH *(Immediately Dangerous to Life or Health).* - Teneur plafond à laquelle, dans un délai maximal d'exposition de 30 minutes, il est possible à une personne de fuir les lieux exposés sans qu'il n'y ait manifestation de signes fonctionnels d'intoxication, perturbation irréversible de la santé ou décès. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Immission. - Transfert d'un polluant de l'atmosphère vers un "récepteur" qui peut être une personne, un animal, une plante. La teneur maximale d'immission, mentionnée au chapitre 7, se rapporte au polluant retenu dans les poumons. Il s'agit d'un concept d'origine allemande, adopté par l'ISO.

Létal. - En toxicologie, synonyme de mortel.

MAK *(Maximale Arbeidsplatz Konzentration).* - Teneur limite moyenne admissible en milieu de travail, compte tenu de semaines de 45 heures et de journées de 8 heures. Il s'agit d'une norme établie par la RFA.

MAK-D. - Teneur limite moyenne admissible en milieu de travail, compte tenu de semaines de 45 heures et de journées de 8 heures. Il s'agit d'une norme établie par la RDA.

MAK-K. - Teneur limite admissible en milieu de travail pour une période très courte ne dépassant pas 30 minutes. Il s'agit d'une norme établie par la RDA.

PEL *(Permissible Exposure Limit).* - Teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle peuvent être exposés des travailleurs pendant une période de relève. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Polluant. - Agent physique, chimique ou biologique qui provoque une dégradation dans un milieu donné.

STEL (TLV - *Short Term Exposure Limit).* - Teneur limite à laquelle les travailleurs peuvent être exposés de façon continue pour une courte période sans souffrir d'irritation, de dommage irréversible aux tissus ou d'une narcose suffisamment grave pour accroître la probabilité de blessure par accident, diminuer la capacité de fuir ou réduire physiquement l'efficacité au travail, en prenant pour acquis que la TLV quotidienne n'a pas été dépassée. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH.

Teneur. - Quantité de matière solide, liquide ou gazeuse, rapportée à une masse ou à un volume d'autres matières dans lesquelles elle est en mélange, suspension ou dissolution.

Teneur efficace moyenne. - Dans le cas de la toxicité pour la micro-faune, il s'agit de la teneur à laquelle se produit, chez 50 p. 100 de la population, pour une durée d'exposition donnée, un effet tel que l'immobilisation, la perte de l'équilibre, une déficience de croissance ou même la mort. Abrév. TE 50.

Teneur inhibitrice moyenne. - Dans le cas de la toxicité pour la micro-flore ou la micro-faune, il s'agit de la toxicité qui inhibe à 50 p. 100 une activité biologique (par exemple, la croissance) en un temps déterminé. Abrév. TI 50.

Teneur létale minimale. - Dans le cas de la toxicité pour l'homme (la teneur définie ici peut être extrapolée à l'homme), il s'agit de la plus faible teneur (autre que la TL 50) de l'air en une substance dont l'inhalation a été signalée comme cause de la mort d'un animal ou d'une personne. Abrév. TL min.

Teneur létale moyenne (1). - Dans le cas de la toxicité pour l'animal, il s'agit de la teneur à laquelle meurent, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Abrév. TL 50.

Teneur létale moyenne (2). - À des fins de comparaison ou d'extrapolation dans l'étude de la toxicité pour l'homme, il s'agit de la teneur (calculée) de l'air en une substance dont l'inhalation est censée provoquer, au bout d'un temps donné, la mort de 50 p. 100 d'une population homogène d'animaux. Elle est déterminée par suite de l'exposition d'un lot statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population. Abrév. TL 50.

Teneur plafond. - Teneur maximale admissible établie pour une durée d'exposition bien déterminée, dans le cas d'une substance très toxique. (L'IDLH et la TLV® -C sont des teneurs plafonds.)

Teneur toxique minimale. - La plus faible teneur de l'air en une substance à laquelle des personnes ou des animaux ont été exposés, pour quelque période de temps que ce soit, sans qu'il ait eu d'effet toxique chez les personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes. Abrév. TT min.

Titre (d'une solution, en chimie). - Rapport de la masse d'une substance dissoute

à la masse totale ou du nombre de moles d'un constituant au nombre total de moles.

TLV• *(Threshold Limit Value).* - Teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle la majorité des travailleurs peuvent être exposés régulièrement à raison de 8 heures par jour, 5 jours par semaine, sans subir d'effet nocif. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH.

TLV• -C *(Threshold Limit Value-Ceiling).* - Teneur limite admissible pour un moment donné. Il s'agit d'une valeur plafond définie et déterminée par l'ACGIH.

Tolérance moyenne. - Niveau de tolérance correspondant à la teneur à laquelle 50 p. 100 des sujets d'un test survivent au bout d'un temps donné. Abrév. TLm.

SIGLES

ACGIH	American Conference of Government Industrial Hygienists
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWQC	Ambient Water Quality Criteria (USA)
AWWA	American Water Works Association
CAS	Chemical Abstracts Service Registry System
CBG	Chemical Buyer's Guide (USA)
CCD	Condensed Chemical Dictionary (USA)
CCPA	Canadian Chemical Producers Association
CCT	Commission canadienne des transports
CHRIS	Chemical Hazards Response Information System (USA)
DOT	Department of Transportation (USA)
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
ITII	International Technical Information Institute (Japon)
MCA	Manufacturing Chemists Association (USA)
MDT	Ministère des Transports (du Canada)
NACE	National Association of Corrosion Engineers (USA)
NAS	National Academy of Sciences (USA)
NFPA	National Fire Protection Association (USA)
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
NRC	National Research Council (USA)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (USA)
STCC	Standard Transportation Commodity Code (Amérique du Nord)

INTRODUCTION

La collection "Enviroguide" vise à fournir une information poussée sur les techniques d'intervention et l'établissement de stratégies en cas de déversement de substances d'intérêt très prioritaire. Chaque volume constitue une "monographie" succinte qui porte sur une substance; on y trouve de l'information sur les propriétés, le comportement, la diffusion, les effets de la substance, ainsi que sur les techniques de protection et de nettoyage des lieux. Une importance primordiale est accordée à la question des effets sur l'environnement et la santé, et cela dans le contexte canadien, qu'il s'agisse du climat, de la réglementation ou des équipements. Les grands principes de l'intervention en cas de déversement ne sont pas exposés dans les volumes de la collection; en revanche, on y résume l'information trouvée dans la documentation accessible au sujet de la substance dont il est question et au sujet de cas concrets de déversements de cette substance.

Le présent manuel d'introduction décrit l'orientation et le contenu de chacun des douze chapitres que l'on retrouve dans tous les volumes de la collection; il expose les fondements théoriques des moyens de calcul utilisés; enfin, il comporte des définitions de bon nombre de termes qui reviennent systématiquement tout au long de la collection. Le tableau de la page 2, présenté sous forme de table des matières, expose la structure et le contenu des Enviroguides.

Chaque chapitre tient compte d'un éventail de conditions aussi vaste que possible, tout en donnant des renseignements d'une utilité immédiate pour toute intervention particulière. Il va sans dire que la collection s'appuie sur une enquête bibliographique très poussée, dont on a tiré des synthèses. Là où l'information doit être adaptée à chaque cas de déversement, par exemple en ce qui concerne la modélisation de la migration du polluant dans tel milieu, les volumes de la collection fournissent des bases théoriques qui valent pour un éventail de circonstances le plus vaste possible. Des indications sur la façon d'utiliser ces éléments théoriques sont données. Les marches à suivre et les exemples de calcul qui apparaissent dans tous les volumes de la collection comportent les mêmes données en ce qui concerne les conditions météorologiques et les masses de produit déversé, de façon à permettre des comparaisons entre les niveaux de gravité des dangers que présentent les différentes substances.

Certaines relations mathématiques ont été tirées de la documentation consultée, alors que d'autres éléments ont été préparés spécialement pour la collection "Enviroguide". Il se peut donc que l'on trouve des différences sur ce plan entre les volumes de la collection et tel ou tel ouvrage portant sur les déversements accidentels. Il faut garder à l'esprit que les auteurs de la collection ont posé des hypothèses qui tiennent compte, d'une façon déterminante, des conditions les plus proches de l'expérience et de la pratique au Canada.

Rien n'est dit de l'organisation, des communications et de la logistique que requiert une intervention; la collection "Enviroguide" s'adresse en effet à des groupes d'intervention qui possèdent déjà une formation et une infrastructure adéquates; elle doit être considérée avant tout comme une source de données mises à la disposition de ces groupes.

Structure et contenu des volumes de la collection "Enviroguide"

Chapitre	Titre	Subdivisions	Contenu
1	Résumé		Aperçu des besoins en matière d'intervention
2	Propriétés physiques et chimiques	Données; variations en fonction de la température et de la pression	Tableau présentant les nombreuses propriétés physico-chimiques dont la connaissance est requise en cas de déversement et d'intervention d'urgence
3	Production, transport et commerce	Fabricants, fabrication; volume de production; principaux centres de production	Niveaux de protection; utilisateurs; fournisseurs; volumes transportés et principaux itinéraires
4	Manutention du produit et compatibilité des matériaux	Citernes et autres récipients d'expédition; équipement et opérations de déchargement; compatibilité du produit et de certains matériaux	Présentation des véhicules les plus couramment utilisés pour le transport du produit et description de leurs caractéristiques
5	Fuite et migration du produit	Nomogrammes de la fuite; diffusion dans l'atmosphère; comportement sur ou dans l'eau; migration dans le sol	Modèles et calculs permettant de prévoir ou d'évaluer la fuite du produit et sa migration dans l'atmosphère, l'eau et le sous-sol
6	Protection de l'environnement	Eau de boisson; toxicité pour les espèces aquatiques; études sur les effets toxiques; dégradation du polluant	Données permettant d'évaluer les dangers du produit pour l'environnement et de déterminer les exigences en matière de nettoyage
7	Protection de la santé	Normes de qualité d'air ambiant; action irritante; toxicité aiguë; toxicité chronique	Évaluation des dangers encourus par les gens qui habitent au voisinage du lieu d'un déversement et par le personnel de nettoyage
8	Compatibilité chimique		Indications des dangers que constituent les mélanges de produits chimiques à l'occasion d'un déversement
9	Mesures d'intervention et de sécurité	Dangers d'incendie ou d'explosion; nettoyage et épuration; procédés d'épuration; élimination; équipement et vêtements de protection; équipement d'intervention spécialisé	Guide de nettoyage; principes et techniques basés sur des considérations à la fois d'ordre théorique et pratique
10	Cas concrets de déversements		Illustration, par la présentation de cas concrets de déversements, des problèmes particuliers à la substance étudiée, dont la connaissance pourra servir à l'occasion d'une intervention
11	Identification et dosage du polluant	Polluant présent dans l'air, dans l'eau, dans le sol	Choix de méthodes d'analyse selon les particularités du déversement
12	Références bibliographiques		

1 RÉSUMÉ

1.1 Aperçu et objectifs

Le résumé présente les propriétés de la substance dont la connaissance est de la plus grande utilité dans la perspective d'une intervention en cas de déversement accidentel. Lorsque faire se peut, les propriétés des substances commerciales sont données, de même qu'une information quantitative.

1.2 Choix et présentation des données

Les données portent principalement sur les points suivants:

a) Identification de la substance: appellation(s), numéro ONU, numéro CAS;

b) Indication des marques d'identification (sur étiquette, plaque, etc.);

c) Indication du danger le plus imminent (la tâche la plus pressante après l'identification de la substance);

d) Indication de données quantitatives concernant les propriétés physiques les plus importantes;

e) Indication des dangers pour l'environnement (lorsque des données quantitatives sont jugées utiles, elles sont fournies; mais en général il est plus utile de signaler les voies de pénétration dangereuses et les espèces menacées);

f) Indication des dangers pour la santé (insistance mise sur les effets aigus auxquels sont exposées les personnes se trouvant à proximité des lieux de l'accident, soit les habitants de l'endroit et les membres des forces d'intervention);

g) Indication des mesures de première intervention en cas de déversement et des mesures de lutte contre l'incendie adaptées aux propriétés de la substance (ces mesures sont forcément générales, les modalités des meilleures interventions étant souvent dictées par les particularités des lieux touchés);

h) Indication des techniques d'intervention et de nettoyage adaptées aux particularités de la substance (ces techniques doivent être appliquées différemment selon que les lieux touchés et les environs présentent telles ou telles caractéristiques).

2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

2.1 Aperçu et objectifs

La collection "Enviroguide" traite de tous les aspects non seulement des déversements mais aussi de la prévision contre les déversements. Chaque guide comporte une liste des propriétés dont la connaissance est nécessaire pour évaluer les besoins en matière d'intervention immédiate et mettre sur pied des plans d'intervention d'urgence. Le confinement d'un liquide déversé ou la lutte contre l'incendie, par exemple, sont des opérations qui exigent que l'on connaisse la masse volumique du liquide et les données relatives à l'inflammabilité et à la combustion. Pour prévoir la propagation d'un polluant dans l'environnement et ses effets à long terme, des données encore plus détaillées sont requises. Ainsi, l'étalement d'une substance sur le sol ou sur l'eau se fera de telle ou telle façon selon sa masse volumique, sa viscosité, sa vitesse d'évaporation, sa chaleur de vaporisation et sa tension de vapeur en fonction de la température; par ailleurs, l'action toxique dans l'eau varie selon la solubilité.

2.2 Sources d'information

La collection "Enviroguide" présente des données extraites en grande partie de la documentation accessible; d'autres données proviennent des entreprises qui fabriquent les matières et les matériaux étudiés. Seules quelques valeurs ont fait l'objet de vérifications expérimentales par les auteurs; et dans les cas où les valeurs fournies par différentes sources pour une même propriété différaient, les auteurs ont opté pour les valeurs les mieux étayées. Si une valeur paraît suspecte au lecteur, l'indication de la source permet de faire la vérification qui s'impose. Dans la mesure du possible, les valeurs sont exprimées en unités du système international; le système C.G.S. (centimètre, gramme, seconde) a néanmoins été utilisé à l'occasion, en particulier pour les besoins de la modélisation. Certaines données ont été mises en graphique lorsque cela a été jugé utile: il en est ainsi du rapport entre la température et la tension de vapeur (aussi appelée *pression de vapeur*).

2.3 Cas particuliers de terminologie

Il y a des termes dont le sens fluctue facilement d'un utilisateur à l'autre. Aussi a-t-il été nécessaire de préciser le sens d'un certain nombre de termes, afin de s'assurer d'une bonne compréhension et d'une indispensable cohérence au sein de la collection. Voici quelques termes au sujet desquels des précisions s'imposent.

2.3.1 Données relatives à l'inflammabilité et à la combustion

Inflammable s'applique à une substance ayant un point d'éclair, en coupelle fermée, inférieur à 37,8 °C (100 °F).

Combustible s'applique à une substance ayant un point d'éclair, en coupelle fermée, supérieur à 37,8 °C (100 °F).

Incombustible s'applique à une substance ni inflammable ni combustible; elle ne brûle pas dans l'air.

L'expression *limites d'inflammabilité* désigne les limites permettant d'entretenir la combustion; les limites d'explosion sont les limites de détonation.

2.3.2 Solubilité (d'une substance). - Les ouvrages de référence consultés utilisaient diverses échelles pour décrire la solubilité. À un extrême, étaient considérées solubles les substances dont la solubilité était comprise entre 0,2 et 1 g/100 ml, et insolubles celles dont la solubilité était inférieure à 0,02 g/100 ml. À l'autre extrême, une valeur de 25 p. 100 correspondait à une substance "soluble"; une valeur inférieure à 25 p. 100, à une substance "légèrement soluble". Dans la collection "Enviroguide", les auteurs ont adopté l'échelle de solubilité relative suivante:

Miscible:	>100 g/100 ml
Très soluble:	de 50 à 100 g/100 ml
Soluble:	de 10 à 50 g/100 ml
Moyennement soluble:	de 1 à 10 g/100 ml
Légèrement soluble:	de 0,1 à 1 g/100 ml
Insoluble:	<0,1 g/100 ml.

Les données exprimées dans une autre échelle ont été converties pour s'intégrer à l'échelle ci-dessus. Dans certains cas de toxicité extrême pour la vie aquatique, on sait que certaines substances dites insolubles se dissolvent suffisamment pour constituer une menace. Toutefois, la présente échelle sert principalement à évaluer la diffusion du produit dans l'eau. Son but n'est pas de servir de base pour évaluer la toxicité dans l'eau; en cas de toxicité moyenne pour la vie aquatique, même les substances ayant une solubilité de 0,1 g/100 ml (soit 1000 mg/l) se dissolvent suffisamment pour constituer une menace.

2.4 Termes de chimie et de physique

Azéotrope	Désigne un mélange liquide constitué d'au moins deux substances mais se comportant comme une seule en ce sens que les vapeurs qui s'en dégagent possèdent la même composition que le liquide; on l'appelle aussi "mélange à point d'ébullition constant".
Capacité calorifique (à pression constante)	Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'une substance dans des conditions de pression constante; cette valeur peut servir à calculer l'accroissement de température d'une substance au cours d'un incendie.

Capacité calorifique (à volume constant)	Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'une substance dans des conditions de pression constante; elle peut être évaluée à partir de la capacité à pression constante et du rapport capacité à pression constante/capacité à volume constant ou du facteur de compressibilité (représenté par γ ou Z).
Caractéristiques de combustion	Description des caractéristiques de la flamme (donnée uniquement pour les flammes possédant des caractéristiques inhabituelles).
Chaleur d'hydratation	Quantité de chaleur dégagée ou absorbée lorsqu'une (ou plusieurs) molécule d'eau vient s'ajouter à la structure cristalline.
Chaleur de combustion	Quantité de chaleur dégagée durant la combustion d'une substance.
Chaleur de cristallisation	Quantité de chaleur dégagée au moment où se produit la cristallisation d'une substance.
Chaleur de décomposition	Quantité de chaleur dégagée durant la décomposition d'une substance ou nécessaire pour produire cette décomposition.
Chaleur de dilution	Quantité de chaleur dégagée ou absorbée durant la dilution d'une substance (habituellement avec de l'eau).
Chaleur de dissolution	Quantité de chaleur dégagée durant la dissolution dans l'eau ou nécessaire pour produire cette dissolution.
Chaleur de formation	Quantité de chaleur dégagée ou absorbée lorsqu'un composé est formé à partir des éléments à leur état normal, à une température et à une pression données.
Chaleur de polymérisation	Quantité de chaleur dégagée durant la formation d'un polymère.
Chaleur de transition	Quantité de chaleur dégagée ou absorbée lorsqu'une substance passe d'un état à un autre ou d'une forme à une autre.
Chaleur de vaporisation	Quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser une substance à température constante.
Chaleur latente de fusion	Quantité de chaleur nécessaire pour transformer un solide en liquide à température constante.
Chaleur latente de sublimation	Quantité de chaleur nécessaire pour volatiliser une substance solide; elle est égale à la somme des chaleurs latentes de fusion et de vaporisation.
Chaleur spécifique	Voir *capacité calorifique*.
Coefficient de dilatation thermique	Accroissement des dimensions d'un matériau avec la température; ce coefficient peut être linéique ou volumique (cubique).
Coefficient de partage octanol/eau	Rapport de la teneur en une substance de l'octanol à la teneur en cette substance de l'eau, dans un système octanol/eau.

Comportement au feu	Tout comportement caractéristique susceptible d'accroître considérablement le danger que constitue la substance en combustion (par exemple, fumée dense, vapeurs inflammables, fumée toxique, risque de polymérisation ou d'explosion).
Composition de la solution commerciale type (en %)	Correspond à la pureté des produits renfermant un seul constituant, ou à la composition des produits renfermant plusieurs constituants, y compris les stabilisants et les inhibiteurs.
Concentration (ou teneur) de saturation	Concentration de la vapeur d'une substance, au-dessus de laquelle toute vaporisation ultérieure est impossible; on peut calculer cette concentration à l'aide de l'équation suivante: $C_S = 1315{,}12(R)^{-1}\,(P_V)\,(M)\,(T)^{-1}$ où: C_S est la concentration de saturation (mg/m^3); R est la constante des gaz parfaits (0,08205 l . atm/mol . K); P_V est la pression de vapeur (mm de Hg); T est la température absolue (K) (température en °C + 273,16); M est la masse moléculaire en gramme; 1315,12 est un facteur de conversion.
Conditions normales	Conditions correspondant à une pression de 101,1 kPa (1 atm) et à une température de 20 °C.
Conductivité électrique	Aptitude de l'unité de volume d'un matériau à conduire l'électricité; c'est l'inverse de la résistivité.
Conductivité thermique	Capacité d'un matériau à conduire la chaleur lorsqu'il est soumis à un gradient de température. Plus cette valeur est élevée, plus le matériau est bon conducteur; plus elle est faible, plus le matériau est bon isolant.
Constante d'ionisation	Degré d'ionisation ou de dissociation d'une substance dans l'eau.
Constante de dissociation	Degré de dissociation d'une molécule ionique dans un milieu (normalement de l'eau).
Constante de la loi d'Henry	Rapport de la teneur en une substance de l'eau à la teneur de l'air en cette substance directement au-dessus de la surface; on peut calculer cette constante à l'aide de l'équation suivante: $H = \frac{16\,P_p\,M}{T\,S}$ dans laquelle H est la constante de la loi d'Henry, P_p est la pression partielle (en mm de Hg), M est la masse moléculaire, T est la température absolue (en degrés Kelvin) et S est la solubilité (en ppm).
Constante diélectrique	Indice de la capacité d'une substance à résister à la transmission d'une force électrostatique; plus cette valeur est faible, plus la résistance est élevée. À 20 °C, la constante diélectrique de l'air est de 1 et celle de l'eau, de 80.

Densité relative

Rapport de la masse volumique d'une substance à la masse volumique de l'eau à 4 °C. Les substances possédant une densité supérieure à 1 s'enfoncent dans l'eau, tandis que celles possédant une densité inférieure à 1 flottent sur l'eau. La densité relative de l'eau de mer est de 1,03.

Densité de vapeur

Rapport de la masse volumique d'une vapeur ou d'un gaz à la masse volumique de l'air; un gaz de densité supérieure à 1 demeure au ras du sol.

Diffusivité

Vitesse de diffusion des molécules dans l'air ou dans l'eau au repos.

Énergie de Gibbs

Synonyme d'*énergie libre de formation*.

Énergie libre de formation

Énergie totale (enthalpie et entropie) nécessaire pour former une molécule à partir de ses atomes constitutifs.

Énergie réticulaire (d'un cristal)

Énergie de formation d'une structure cristalline; elle correspond aussi à l'énergie nécessaire pour détruire cette structure.

Enthalpie

Correspond dans la plupart des cas à l'énergie calorifique, c.-à-d. la chaleur, renfermée dans une substance; c'est l'énergie utilisable contenue dans une molécule ou un groupe de molécules.

Entropie de formation

Énergie non utilisable correspondant, dans une molécule, à l'agencement des atomes constitutifs et à leur mouvement.

Épreuve au bloc de plomb

Technique d'évaluation des explosifs basée sur la mesure de la déformation produite par la détonation sur un bloc de plomb.

Équation d'Antoine sur la pression de vapeur

Expression se présentant sous la forme:

$$\log P_V = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2}$$

dans laquelle A, B et C sont des constantes qui varient d'une substance à l'autre; T est la température et P_V est la pression de vapeur. Dans le cas de certaines substances, l'équation décrivant la pression de vapeur est bien établie et figure dans les volumes de la collection.

État

Les trois états d'un corps sont l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux.

Expansion causée par la polymérisation

Rapport des volumes d'une substance avant et après polymérisation.

Explosibilité

Sensibilité d'une substance à la détonation sous l'effet d'une étincelle, d'un choc, d'un échauffement, etc.

Facteur de compressibilité

Compression maximale qu'on peut exercer sur un gaz sans le liquéfier; ce facteur est soit représenté par la lettre grecque γ ou par Z, soit le rapport des capacités calorifiques pression constante/volume constant.

Facteur de conversion masse-volume pour les vapeurs	Facteur permettant de convertir, dans le cas des teneurs, les ppm en mg/m^3.
Hygroscopicité	Capacité d'une substance à absorber l'humidité contenue dans l'air.
Indice de réfraction	Rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à celle dans la substance considérée.
Inflammabilité	Aptitude d'une substance à s'enflammer.
Limite inférieure d'explosion	Teneur minimale de l'air en une substance pouvant provoquer une détonation sous l'effet d'une étincelle, d'un choc, d'un échauffement, etc.
Limite inférieure d'inflammabilité	Teneur minimale de l'air en une substance pouvant provoquer une inflammation au contact d'une source d'inflammation.
Limite supérieure d'explosion	Teneur minimale de l'air en une substance pouvant provoquer une détonation sous l'effet d'une étincelle, d'un choc, d'un échauffement, etc.
Limite supérieure d'inflammabilité	Teneur minimale de l'air en une substance pouvant provoquer une inflammation au contact d'une source d'inflammation.
Masse atomique	Masse relative d'un élément déterminée par le nombre total de protons et de neutrons; cette masse est établie en prenant 12 000 comme masse du carbone.
Masse moléculaire	Somme des masses atomiques des éléments d'une molécule.
Masse volumique	Masse de l'unité de volume à une température donnée.
Masse volumique apparente	Masse de l'unité de volume d'une poudre ou d'un agrégat.
Masse volumique de la vapeur saturante	Masse de l'unité de volume d'une vapeur à une température donnée.
Mélange eutectique	Pourcentage massique d'une substance qui, en mélange avec une autre, (par exemple, l'eau), donne un point de fusion minimal.
Moment dipolaire	Mesure de la séparation des charges dans une molécule; il s'agit, plus précisément, du produit des charges par la distance qui les sépare.
Plage de distillation	Plage de température à l'intérieur de laquelle se distille une certaine fraction; on emploie ce terme uniquement dans le cas de mélanges.
Point d'ébullition	Température d'ébullition d'une substance sous une pression ambiante de 101,3 kPa (pression atmosphérique); on donne parfois la pression à laquelle la substance bouille, plus particulièrement lorsque l'ébullition se produit à une pression différente de la pression atmosphérique.
Point d'éclair	Température minimale à partir de laquelle les vapeurs d'une substance combustible volatile s'enflamment dans l'air au contact d'une flamme; le point d'éclair est mesuré en creuset ouvert ou en creuset fermé selon le type d'appareil utilisé.

Point d'écoulement	Température minimale à laquelle un liquide peut s'écouler d'un récipient normalisé.
Point d'inflammation	Synonyme de *température d'inflammation spontanée*.
Point de congélation	Température à laquelle un liquide devient solide.
Point de fusion	Température à laquelle un solide devient liquide.
Point triple	Température à laquelle les trois phases (solide, liquide et gazeuse) sont en équilibre.
Potentiel d'ionisation	Quantité minimale d'énergie nécessaire pour extraire un électron d'un atome ou d'une molécule, et ainsi donner un ion positif; les potentiels d'ionisation qui figurent dans les Enviroguides s'appliquent aux substances à l'état gazeux et sont donnés en eV.
Pression de vapeur	Pression de la vapeur en équilibre avec la phase liquide à une température donnée. Syn.: tension de vapeur.
Rapport des capacités calorifiques	Rapport de la capacité calorifique à pression constante à la capacité calorifique à volume constant; ce rapport s'appelle aussi facteur de compressibilité molaire.
Résistivité	Résistance qu'offre un centimètre cube d'un matériau au passage de l'électricité.
Risque de retour de flamme	Indication quant à la facilité ou au risque de propagation de la flamme par les vapeurs, normalement jusqu'à la source des vapeurs.
Sensibilité au choc	Sensibilité au choc d'une substance explosive.
Solubilité	Quantité d'une substance dans une autre à une température donnée.
Taux d'évaporation	Quantité de liquide se transformant en gaz, par m^2 de nappe, à la seconde.
Température critique	Température au-dessus de laquelle un gaz ne peut être liquéfié par simple compression.
Température d'inflammation spontanée	Température minimale à laquelle une substance s'enflamme spontanément en l'absence de flamme ou d'étincelle.
Température de décomposition	Température à laquelle une substance se décompose en substances plus simples.
Température de déflagration	Température à laquelle les particules de substance explosive s'enflamment spontanément et brûlent rapidement; ce phénomène, qui se produit à la surface de la substance, est caractéristique des explosifs peu puissants.
Température de détonation	Température à laquelle la décomposition d'un explosif se propage extrêmement rapidement en produisant une puissante onde de choc.
Température de la flamme	Température maximale atteinte par une flamme durant la combustion d'une substance.

Température de polymérisation	Température à laquelle une substance peut se polymériser.
Température de sublimation	Température à laquelle une substance se sublime, c.-à-d. passe directement de la phase solide à la phase gazeuse, sans passer par la phase liquide. Syn.: point de sublimation.
Température de transition	Température à laquelle une substance passe d'une phase à une autre.
Tension interfaciale	Voir *tension superficielle à l'interface liquide-air* et *tension superficielle à l'interface liquide-eau.*
Tension superficielle	Voir *tension interfaciale.*
Tension superficielle à l'interface liquide-air	Mesure de la force, à la surface d'un liquide, responsable de la sphéricité des gouttelettes de liquide; les liquides possédant une tension superficielle élevée ont moins tendance à s'étaler sur une surface plane.
Tension superficielle à l'interface liquide-eau	Mesure des forces à l'interface liquide-eau; cette tension correspond à peu près à la différence entre la tension superficielle du liquide à l'interface liquide-air et la tension superficielle de l'eau à l'interface eau-air. Les liquides possédant une faible tension interfaciale s'étalent facilement sur l'eau.
Viscosité	Résistance d'une substance à l'écoulement à une température donnée; les substances de viscosité élevée sont épaisses et visqueuses.
Vitesse de combustion	Vitesse (en millimètres par minute) à laquelle diminue l'épaisseur d'une nappe de liquide enflammé.
Vitesse de détonation	Vitesse de propagation de l'onde de choc dans l'explosif.
Vitesse de la flamme	Vitesse de propagation du front d'une flamme.
Volume molaire	Volume occupé par une mole (masse en gramme correspondant à la masse moléculaire) à une température et à une pression données (bien souvent dans des conditions normales).

2.5 Établissement des diagrammes de phases

2.5.1 Introduction générale. - Selon les conditions où il est placé, un corps peut exister à l'état de solide, de liquide ou de gaz. La relation entre les conditions ambiantes et l'état d'agrégation d'un corps est illustrée par son diagramme de phases. Le cas de l'eau est illustré à la figure 1.

La pression P apparaît sur l'axe vertical et la température T, sur l'axe horizontal. La valeur de ces deux paramètres détermine l'état d'agrégation. Le diagramme de phases le plus simple est constitué de trois lignes différentes, AB, AC et AD. La ligne AB représente les conditions où la phase liquide et la vapeur* sont en équilibre; la ligne AC, les conditions où la

* Au-dessous de la température critique, un gaz prend aussi le nom de *vapeur.*

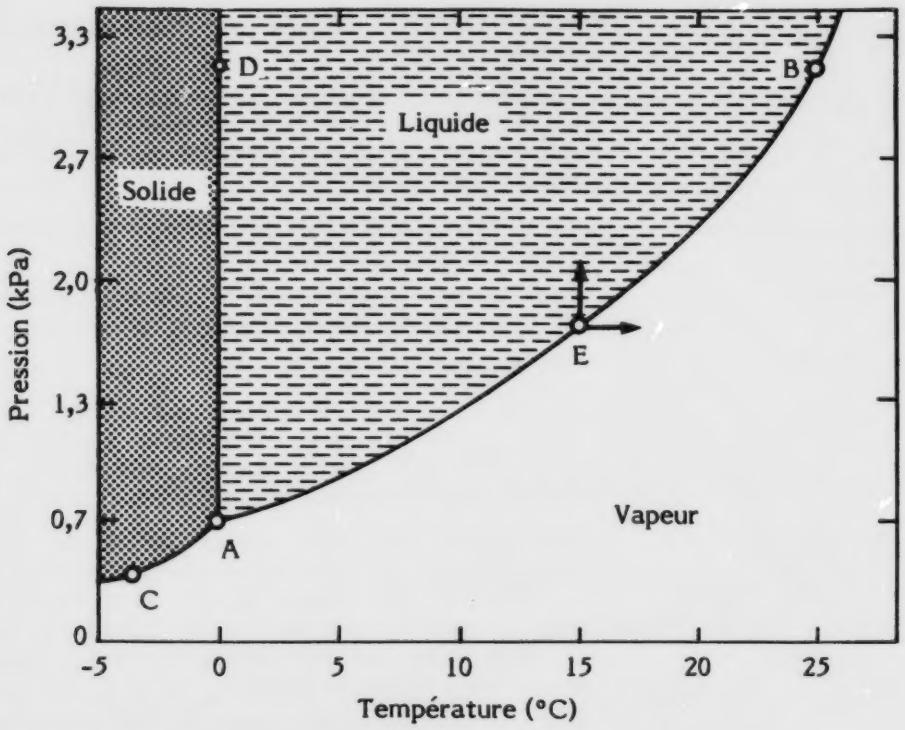


Figure 1 DIAGRAMME DE PHASES DE L'EAU

phase solide est en équilibre avec la vapeur; et la ligne AD, les conditions où la phase solide est en équilibre avec la phase liquide. Le point A du diagramme s'appelle point triple: c'est le point où les trois phases sont en équilibre (T = 0 °C et P = 0,67 kPa pour l'eau). Les zones désignées par les mots ***solide***, ***liquide*** et ***vapeur*** correspondent aux phases en équilibre sur chaque ligne.

Dans la plupart des diagrammes de phases, la pression critique P_C et la température critique T_C sont données. La température critique est celle au-dessus de laquelle il est impossible de condenser la vapeur uniquement en la comprimant. La pression critique est la pression de vapeur à la température critique. Les conditions "normales" de pression et de température correspondent respectivement à 101,325 kPa (pression atmosphérique) et à 20 °C.

Pour beaucoup de corps étudiés dans la collection "Enviroguide", on ne possède pas de données expérimentales complètes. Toutefois, il est possible de se servir d'expressions mathématiques pour évaluer de façon assez précise les données nécessaires pour établir un diagramme de phases.

2.5.2 Méthodes d'estimation des diagrammes de phases

2.5.2.1 Estimation de l'équilibre liquide-vapeur. - L'équation d'Antoine est la relation la plus simple à utiliser; toutefois, elle ne s'applique que dans la plage de températures où la substance est normalement liquide. Si l'équation est utilisée à des températures inférieures au point de fusion, on obtiendra la pression de vapeur du liquide en surfusion, qui est supérieure à la pression de vapeur du solide véritablement "cristallin".

L'équation se présente sous beaucoup de formes selon les paramètres connus. Voici un exemple de l'équation d'Antoine (on trouve les constantes dans la documentation; elles sont indiquées pour différentes substances et différents intervalles de température):

$$\log P_v = A + \frac{B}{T} + C \log T + DT \text{ (Yaws, 1974)}$$

où P_v est la pression de vapeur du liquide saturé (en mm de Hg) et T, la température (en kelvins, K); A, B, C et D sont des constantes de corrélation.

EXEMPLE

Pour le benzène, la plage d'applicabilité va de 7,6 °C à 289,4 °C. Les constantes d'Antoine étant données (la pression de vapeur mesurée expérimentalement à 20 °C est de 10,1 kPa), calculer P_v (en mm de Hg):

$A = 51,204$

$B = -3245,7$

$C = -16,403$

$D = 7,540 \times 10^{-3}$

$P_v = 74,97$ mm de Hg = 9,995 kPa.

Lorsqu'on ne connaît aucune des constantes A, B, C et D, il est possible d'utiliser la forme suivante de l'équation d'Antoine (Little, 1981):

$$\log \text{nat. } P_v = \frac{\Delta H_{vb} (T_b - C_2)^2}{\Delta Z_b R T_b^2} \left[\frac{1}{(T_b - C_2)} - \frac{1}{(T - C_2)} \right]$$

où

P_v = pression de vapeur (en mm de Hg)

ΔZ_b = facteur de compressibilité au point d'ébullition (valeur utilisée: 0,97)

T_b = point d'ébullition (en kelvins)

C_2 = constante

T = température (en kelvins)

ΔH_{vb} = chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition.

La règle de Thomson (Thomson, 1959) permet d'évaluer la constante C_2:

$$C_2 = -18 + 0{,}19\ T_b$$
$$= -18 + 0{,}19\ (353{,}25\ K) = 49{,}12.$$

Lorsque la chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition n'est pas connue, il est possible de l'évaluer grâce à la méthode de Fishtine (1963); il s'agit d'une modification de l'équation de Kistiakovskii (1921):

$$\frac{\Delta H_{vb}}{T_b} = K_F\ (8{,}75 + R \log \text{nat. } T_b)$$

où: K_F = facteur calculé d'après les moments dipolaires de molécules polaires et non polaires (Little, 1981) (tableau 1)

R = constante des gaz (1,987 cal/(mol . K))

T_b = point d'ébullition (en kelvins).

Pour le benzène, $K_F = 1{,}00$ et $T_b = 353{,}25$ K; par conséquent:

$$\frac{\Delta H_{vb}}{T_b} = 1{,}00\ (8{,}75 + 1{,}987\ \text{cal/(mol . K)}\ \log \text{nat. } 353{,}25\ K)$$
$$= 20{,}41\ \text{cal/(mol . K)}.$$

Donc, à 20 °C:

$$\log \text{nat. } P_v = \frac{20{,}41\ \text{cal/(mol . K)}\ (353{,}25\ K - 49{,}12\ K)^2}{0{,}97 \times 1{,}987\ \text{cal/(mol . K)} \times 353{,}25\ K} \left[\frac{1}{(353{,}25\ K - 49{,}12\ K)} - \frac{1}{(293{,}15\ K - 49{,}12\ K)}\right]$$

$$\log \text{nat. } P_v = -2{,}24564$$

$$P_v = 0{,}10586\ \text{atm} \times 101{,}325\ \text{kPa/atm} = 10{,}73\ \text{kPa}.$$

Cette valeur se compare bien à la valeur mesurée (10,1 kPa). À noter que la seule donnée expérimentale utilisée est le point d'ébullition.

2.5.2.2 Estimation de l'équilibre solide-vapeur. - Dans l'équation précédente, on supposait que $\Delta H_{vb}/\Delta Z_b$ ne variait pas avec la température; cette hypothèse peut donner des estimations imprécises, surtout à des températures inférieures au point de fusion. Toutefois, la modification suivante de la corrélation de Watson tient compte de la variation de ΔH_{vb} avec la température (Watson, 1943):

Tableau 1
Facteurs K_F pour les composés organiques aliphatiques et alicycliques*

Type de composé	Nombre d'atomes de carbone (*N*) dans le composé, y compris les atomes du groupement fonctionnel											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 à 20
HYDROCARBURES												
N-alcanes	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Isomères d'alcanes				0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Mono- et dioléfines et leurs isomères		1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00
Hydrocarbures cycliques saturés		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Dérivés alkyle d'hydrocarbures cycliques saturés				0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
HALOGÉNURES (saturés et non saturés)												
Monochlorures	1,05	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01
Monobromures	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01
Moniodures	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Polyhalogénures (non complètement halogénés)	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,01
Halogénures mixtes (complètement halogénés)	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Perfluororhydrocarbures	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
COMPOSÉS CONTENANT LE GROUPEMENT CARBONYLE												
Esters		1,14	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01
Cétones			1,08	1,07	1,06	1,06	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01
Aldéhydes		1,09	1,08	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01
COMPOSÉS AZOTÉS												
Amines primaires	1,16	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05**
Amines secondaires		1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03**
Amines tertiaires			1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Nitriles		1,05	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01
Composés nitro	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01
COMPOSÉS DU SOUFRE												
Thiols	1,05	1,03	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Sulfures		1,03	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
ALCOOLS												
Alcools (un seul groupement OH)	1,22	1,31	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,26	1,24	1,24**
Diols (glycols ou glycols condensés)		1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33				
Triols (glycérol, etc.)			1,38	1,38	1,38							
Cyclohexanol, cyclohexyl-méthanol, etc.						1,20	1,20	1,21	1,24	1,26		
COMPOSÉS DIVERS												
Éthers (aliphatiques uniquement)		1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Oxydes (éthers cycliques)		1,08	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,01	1,01

* Composés carbocycliques ou hétérocycliques ayant des propriétés aliphatiques.
** Pour $N = 12$ uniquement; aucune prévision du K_F n'a été faite pour $N > 12$.

Notes
1. Un groupement phényle est considéré comme un seul atome de carbone.
2. Les facteurs K_F sont les mêmes pour tous les isomères aliphatiques d'un composé donné. Par exemple, $K_F = -1,31$ pour le *n*-butanol, l'*iso*-butanol, le *tert*-butanol et le *sec*-butanol.
3. Dans les composés organo-métalliques, considérer tout atome de métal comme un atome de carbone.
4. Pour les composés qui ne sont pas compris dans le présent tableau, supposer que $K_F = 1,06$.

$$\log \text{nat. } P_v = \frac{\Delta H_{vb}}{\Delta Z_b R T_b} \left[\frac{1 - (3-(2 T_{\rho b}))^m - 2m (3-(2 T_{\rho b}))^{m-1} \log \text{nat. } T_{\rho b}}{T_{\rho b}} \right]$$

où: $T_{\rho b} = T/T_b$ (rapport température d'intérêt/point d'ébullition pour la substance, en kelvins)

m = constante qui dépend de l'état d'agrégation à la température d'intérêt.

Pour tous les liquides, $m = 0,19$

$T_{\rho b} > 0,6$; $m = 0,36$

$0,6 > T\rho b > 0,5$; $m = 0,8$

$T_{\rho b} < 0,5$; $m = 1,19$.

En se servant de la méthode de Fishtine (Fishtine, 1963), on obtient, pour 20 °C:

$$\frac{\Delta H_{vb}}{T_b} = 20,41 \text{ cal/(mol . K)}$$

où: m = 0,19 (le benzène est liquide à 20 °C)

$$T_{\rho b} = \frac{293,15 \text{ K}}{353,1 \text{ K}} = 0,830$$

$$\log \text{nat. } P_v = \frac{20,41 \text{ cal/(mol . K)}}{0,97 \times 1,987 \text{ cal/(mol . K)}} \left[\frac{1 - (3-2(0,83))^{0,19}}{0,83} - 2m (3-2 (0,83))^{-0,81} \log \text{nat. } 0,83 \right]$$

$$\log \text{nat. } P_v = 2,307$$

$$P_v = 0,0995 \text{ atm} \times \frac{101,325 \text{ kPa}}{\text{atm}} = 10,09 \text{ kPa}.$$

Cette relation peut aussi être utilisée avec grande précision dans l'intervalle où la substance est normalement liquide.

2.5.2.3 Estimation de l'équilibre solide-liquide. - Il est possible d'estimer la variation de la pression avec la température en se servant de l'équation de Clapeyron (Castellan, 1971):

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta S_f}{\Delta Vf} = \frac{\Delta H_f}{T_f \Delta V_f} = \frac{\Delta S_f}{\Delta V_f} = \frac{\Delta H_f}{T_f \Delta V_f}$$

où: ΔH_f = chaleur latente de fusion

ΔV_f = volume du liquide - volume du solide (près du point de fusion)

ΔS_f = entropie de fusion au point de fusion

T_f = point de fusion (en kelvins)

$\frac{dp}{dT}$ = vitesse de changement de la pression avec la température.

La chaleur latente de fusion peut être obtenue de diverses sources. Cependant, la masse volumique du solide et du liquide à diverses températures, qui est nécessaire pour déduire le volume molaire, est souvent difficile à trouver.

La méthode de Bhirud (Bhirud, 1978) permet une estimation:

$$\rho_l = \frac{MP_c}{RTe^{a + wb}}$$

où: ρ_l = masse volumique du liquide

M = masse moléculaire (78,11 g par mol pour le benzène)

P_c = pression critique (48,3 atm pour le benzène)

R = constante des gaz (82,04 cm^3 . atm/(mol . K))

w = facteur de sphéricité de la molécule.

e = facteur exponentiel

Cette dernière valeur peut être calculée grâce à l'équation suivante mise au point par Edminster (Reid, 1977):

$$w = \frac{3}{7}\left[\frac{T_{br}}{1-T_{br}}\right] \log P_c - 1$$

où: $T_{br} = \frac{T_b}{T_c}$

T_b = point d'ébullition

T_c = température critique

P_c = pression critique

a = constante = $1{,}39644 - 24{,}076\ Tr + 102{,}615\ Tr^2 - 255{,}719\ Tr^3 + 355{,}805\ Tr^4 - 256{,}671\ Tr^5 + 75{,}1088\ Tr^6$

b = constante = $13{,}4412 - 135{,}743\ Tr + 533{,}380\ Tr^2 - 1091{,}453\ Tr^3 + 1231{,}43\ Tr^4 - 728{,}227\ Tr^5 + 176{,}737\ Tr^6$

où: $T_r = \frac{T}{T_c}$

Pour le benzène, à 280,15 K:

$$T_{br} = \frac{353{,}25\ K}{562{,}09\ K} = 0{,}62846$$

$$w = \frac{3}{7}\left[\frac{0{,}62846}{0{,}37154}\right] \qquad \log 48{,}3\ \text{atm}^{-1} = 0{,}221$$

$$T_r = \frac{280{,}15\ \text{K}}{562{,}09\ \text{K}} = 0{,}49841$$

donc $a = -1{,}5599$

et $b = -0{,}54866$

donc $$\rho_l = \frac{78{,}11 \times 48{,}3}{82{,}04 \times 280{,}15\ \text{K} \times e} - 1{,}5599 + (0{,}221 \times -0{,}54866)$$

$$\rho_l = 0{,}8818\ \text{g/ml.}$$

Tableau 2
Accroissements volumiques (v_i) pour certains ions* et éléments courants

Élément ou ion	v_i (Å^3)	Erreur - type σ	Nombre de contributions
-H	6,9	0,4	5228
=C=	15,3	0,7	74
-C			
-C	13,7	0,6	453
C	11,0	0,9	1165
=O	14,0	0,5	649
-O-	9,2	0,5	468
N	16,0	1,3	30
N	12,8	0,8	68
N	7,2	0,8	354
S	23,8	0,9	92
-F	12,8	1,5	14
-Cl	26,7	0,5	134
-Br	33,0	0,5	120
-I	45,0	1,3	26
Cl^-	28,9	1,5	39
Br^-	39,3	1,5	20
I^-	56,6	2,5	11
Na^+	13,6	2,2	16
K^+	27,3	1,6	32
Rb^+	34,1	2,2	15
H_2O	21,5	0,8	68
Noyau aromatique (carbones seulement)	75,2	2,5	443
Liaison hydrogène O-H...O	-2,6	0,7	206
Liaison hydrogène N-H...O	-2,8	0,5	152
Liaison hydrogène N-H...N	-0,3	1,7	11
Cycles non aromatiques (est. grossière)	-3,0		

* Différentes coordinences sont considérées pour C, N et O.

La masse volumique du solide au voisinage du point de fusion peut être évaluée à l'aide de l'équation suivante (Little, 1981):

$$\rho_S = \frac{M \times 1{,}660}{V_S}$$

où: ρ_S = masse volumique du solide

V_S = volume calculé d'un cristal monomoléculaire ($Å^3$/molécule)

$V_S = \Sigma_i N_i v_i$

où: v_i = volume unitaire de l'élément i (tableau 2)

N_i = nombre d'atomes de l'élément i dans la molécule.

Cette équation est celle de la méthode d'additivité d'Immirzi et de Perini. Il faut s'en servir avec précaution car les restrictions suivantes s'appliquent:

1) Les cristaux possédant un désordre structural ou ceux qui ne sont pas solides à la température ambiante sont exclus;
2) Les cristaux ne doivent pas renfermer de molécules de solvant à l'exception de l'eau;
3) Seuls les éléments H, C, O, N, S, F, Cl, Br, I, Na, K et Rb sont considérés;
4) Les composés cycliques sont limités aux dérivés du benzène et du naphtalène.

Dans le cas du benzène, d'après les données du tableau 2 (Little, 1981) on obtient:

$N_i \times v_i$.

Benzène = 1 noyau benzénique

(carbones uniquement) = $1 \times 75{,}2 = 75{,}2$

6 atomes d'hydrogène = $6 \times 6{,}9 = 41{,}4$

$V_S = \Sigma_i N_i v_i$

$V_S = (1 \times 75{,}2) + (6 \times 6{,}9) = 116{,}6$ $Å^3$.

Comme $$\rho_S = \frac{1{,}660 \times M}{V_S}$$

$$= \frac{1{,}660 \times 78{,}11}{116{,}6} = 1{,}1 \text{ g/cm}^3.$$

La masse volumique du solide et celle du liquide étant maintenant connues, il est donc possible d'évaluer ΔV_f:

$$\Delta V_f = V_{liquide} - V_{solide} = \left[\frac{1}{0{,}88 \text{ g/cm}^3} - \frac{1}{1{,}11 \text{ g/cm}^3}\right] \times 78{,}11 \text{ g/mole}$$

$\Delta V_f = 18{,}39$ cm^3/mole.

Tous les paramètres inconnus ont été évalués; il est maintenant possible de s'en servir pour évaluer dp/dT par substitution dans l'équation de Clapeyron:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_f}{\Delta V_f \, T_f} = \frac{2350{,}03 \text{ cal/mole}}{278{,}53 \text{ K } (18{,}39 \text{ cm}^3\text{/mole})}$$

$$= 0{,}4588 \text{ cal/(cm}^3 \text{ . K)}$$

$$= 1920{,}5 \frac{\text{kPa.}}{\text{°C}}$$

Cette valeur est la pente de la courbe d'équilibre solide-liquide. (Il faut augmenter la pression de 1920,5 kPa pour augmenter le point de fusion de 1 degré Celsius.)

3 PRODUCTION, TRANSPORT ET COMMERCE

Le chapitre trois donne un aperçu de l'importance à accorder au produit dans la prévision contre les accidents, en fournissant une information concise au sujet du volume de production, des centres de production, des principales utilisations et des voies de transport. On est ainsi en mesure d'estimer quelles pourraient être l'ampleur et la fréquence des accidents mettant en cause le produit. Par ailleurs, en connaissant les voies de transport empruntées, il est possible de déterminer les régions qui doivent être protégées par un plan d'intervention d'urgence ou auxquelles doit s'étendre le rayon d'action des services actuels d'intervention, avec amélioration de leur degré de préparation le cas échéant.

Un bref exposé sur la fabrication du produit indique l'équipement et les procédés utilisés. Cela aide à la prévision contre les cas de danger, qu'ils surviennent chez le fabricant ou en cours de transport.

Les descriptions des procédés s'appuient sur les renseignements fournis par les fabricants, sauf dans quelques cas où faute de tels renseignements les auteurs ont eu recours à des ouvrages de référence.

Les qualités commerciales expédiées ont été indiquées, lorsque cela a été possible, de façon qu'on puisse prévoir le comportement du produit en cas de déversement, ainsi que les dangers encourus. Les données relatives à ces qualités ont été obtenues des fabricants ou de sources secondaires. L'information ayant trait aux volumes de production et aux utilisations provient de publications de l'industrie et de services d'information. Les prévisions d'expansion sont également tirées de publications de l'industrie et de communiqués des producteurs, qui ont été considérés alors comme les sources les plus fiables à ce point de vue.

4 MANUTENTION DU PRODUIT ET COMPATIBILITÉ DES MATÉRIAUX

4.1 Aperçu et objectifs

Le chapitre quatre, dont le texte s'accompagne de schémas et de tableaux, traite des citernes et autres récipients de transport du produit, de l'équipement et des opérations de déchargement, ainsi que de la compatibilité chimique des matériaux de fabrication et du produit.

4.2 Sources d'information

Il existe une somme considérable de données auxquelles on a accès sur les wagons-citernes, mais l'information accessible est restreinte en ce qui concerne les camions-citernes, les citernes portables (aussi appelés *citernes amovibles*), les fûts et les bouteilles. Les principales sources utilisées ont été les règlements concernant le transport et les publications des fabricants. Des documents publiés par National Steel Car, Proctor ACFX Railcar Services et GATX ont également servi. Les numéros de spécification de la Commission canadienne des transports et du Department of Transportation (U.S.) pour les wagons pouvant transporter un produit donné ont été tirés des règlements ou obtenus des fabricants de wagons et de sources comme le *Handbook for Compressed Gases*, l'Association canadienne de fabricants de produits chimiques et enfin les divers fabricants de produits chimiques. Dans le cas de produits comme le chlore, des associations professionnelles ainsi que certains ouvrages de référence ont été d'une aide précieuse pour l'obtention de données relatives au transport.

Dans le cas de plusieurs produits, l'information concernant le transport par véhicules-citernes routiers a été plus difficile à trouver. À ce chapitre, la documentation fournie par des constructeurs de citernes tels que Fruehauf, Hutchinson et GATX a été des plus utiles. Plusieurs fabricants de produits chimiques, des collecteurs de déchets de déversement, ainsi que l'Association canadienne du camionnage ont également apporté des renseignements utiles. La plupart des numéros de spécification des camions-citernes proviennent du *Handbook of Compressed Gases* ou de l'Association canadienne des fabricants de produits chimiques.

Les données concernant les fûts et les bouteilles proviennent du Code de transport des *marchandises dangereuses*, du *Handbook of Compressed Gases*, de l'Association canadienne de fabricants de produits chimiques et des fabricants eux-mêmes.

L'information portant sur les précautions à prendre avant de procéder au déchargement d'une citerne et sur les opérations de déchargement de la citerne a été obtenue des fabricants de produits chimiques ou de publications de l'Association canadienne des fabricants de produits chimiques. Certains renseignements fournis par les fabricants de wagons-citernes et de

véhicules-citernes routiers ont également servi. Quant aux spécifications concernant l'équipement de déchargement, elles ont été tirées principalement des données fournies par les fabricants de produits chimiques.

4.3 Choix et présentation des données

Il existe un grand nombre de sources d'information au sujet de la compatibilité chimique des matériaux de fabrication et des produits chimiques. Aussi a-t-il été nécessaire de comparer les données fournies par les différents fabricants de matériaux afin de déterminer de façon cohérente des évaluations des matériaux quant à la compatibilité (matériau "recommandé", matériau recommandé "avec réserves", matériau "déconseillé"). L'évaluation retenue par les auteurs, dans chaque cas, a été l'évaluation la plus basse établie par un fabricant.

En plus des tableaux, dépliants et catalogues qu'il est possible de se procurer auprès des fabricants de matériaux, des sources indépendantes, tels les manuels de l'Hydraulics Institute et les brochures de l'Association canadienne des fabricants de produits chimiques, ont été consultées.

5 FUITE ET MIGRATION DU PRODUIT

5.1 Introduction

La dispersion d'un produit chimique dans l'environnement et le niveau de gravité du risque que présente le déversement d'un produit chimique sont fonction de l'état d'agrégation du produit (solide, liquide, gazeux) et des facteurs locaux (géologie et géographie de l'endroit, relief, température, temps, population et autres variables relatives aux cas de déversement). Le présent chapitre fournit des méthodes de prévision de la diffusion dans l'atmosphère et dans l'eau, ainsi que de la migration dans le sous-sol.

Pour le transport dans chaque milieu, des modèles prévisionnels sont présentés, qui tiennent compte des propriétés physico-chimiques de la substance en cause. Lorsque cela est possible, les relations entre différentes variables - débit de fuite en fonction du diamètre de l'orifice, par exemple - font l'objet d'un graphique ou d'un nomogramme. Ainsi, les effets de plusieurs variables peuvent être vérifiés en effectuant un nombre restreint d'opérations ou de lectures sur graphique.

Il serait possible en théorie d'établir des relations décrivant les caractéristiques de la diffusion en fonction de nombreuses variables relatives au déversement; il est cependant nécessaire, en pratique, de poser certaines hypothèses simplificatrices. Ces dernières permettent de réduire le nombre de variables des modèles de déversement et de faire en un temps raisonnable une évaluation utile (même si elle n'est pas toujours exacte) du comportement diffusionnel.

Dans le cas d'une citerne perforée, on suppose par exemple que la fuite a lieu dans des conditions isothermes. Cette hypothèse ne reflète pas exactement la réalité, mais dans la plupart des cas concrets elle est plus juste que l'hypothèse adiabatique. En fait, l'hypothèse isothermique engendre un scénario de pire cas décrivant un débit de fuite plus grand que dans la réalité.

5.2 Nomogrammes des fuites

5.2.1 Aperçu et objectifs. - Le débit de fuite du produit est l'un des principaux facteurs qui déterminent le niveau de gravité des risques sur le plan de l'inflammabilité et de la toxicité pour l'environnement. Les nomogrammes présentés ci-après permettent d'évaluer rapidement et avec une précision raisonnable les débits de fuite correspondant à divers diamètres d'orifice.

Bien que les nomogrammes valent pour des fuites se produisant dans le cadre d'un ensemble bien précis de conditions, il est possible d'étendre l'application du modèle à de plus larges intervalles de températures et de pressions en se servant des relations mises au point en 5.2.3.

5.2.2 Sources d'information. - Les calculs qui ont mené aux nomogrammes de fuite utilisés dans la collection "Enviroguide" s'appuient sur des principes exposés dans l'*Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook* (Raj, 1974). Les principes fondamentaux de la thermodynamique sont appliqués. Il est posé comme hypothèses que les gaz se comportent comme des gaz parfaits, qu'il y a équilibre thermodynamique et que la fuite se déroule dans des conditions isothermes.

5.2.3 Choix des données. - Pour simplifier les calculs et faciliter les comparaisons entre les valeurs obtenues dans différents Enviroguides, les mêmes données ont été utilisées dans toute la collection, en ce qui concerne les citernes fuyardes et les conditions qui prévalent au moment de la perforation.

Température ambiante = 40 °C (ce qui mène à un scénario de pire cas, compte tenu du climat canadien) ou température normale d'expédition des substances réfrigérées.

Pression = celle qui est la plus élevée, de la pression ambiante ou de la pression de vapeur de la substance.

Volume = 80 000 litres, à moins qu'une citerne spéciale soit utilisée pour transporter la substance.

Masse = l'équivalent de la charge normale d'une citerne de 80 000 litres.

5.2.3.1 Position et diamètre de l'orifice. - L'orifice peut être situé dans le bas de la citerne, et l'on entend par là au-dessous du niveau du liquide, ou dans le haut de la citerne, et l'on entend par là au-dessus du niveau du liquide. (On suppose ainsi qu'un wagon-citerne ayant déraillé demeure sur ses roues.) Les exemples fournis dans les Enviroguides donnent un diamètre équivalent de 250 mm pour un orifice situé dans la paroi supérieure de la citerne et un diamètre équivalent de 150 mm pour un orifice situé dans la paroi inférieure.

Le modèle suppose qu'il y a équilibre thermodynamique (ce qui n'est pas le cas lorsque la perforation est instantanée et la fuite, rapide) et qu'il y a isothermie (ce qui n'est pas davantage réaliste dans le cas d'une fuite rapide). Faut-il rappeler que le modèle procure une évaluation approximative du pire cas de fuite de liquide ou de gaz.

5.2.3.2 Fuite de liquide. - Il y a fuite de liquide lorsque la perforation se produit au-dessous du niveau du liquide. Le débit de fuite q se calcule alors ainsi:

$$q = sC_q \rho_l \sqrt{2 g h + \frac{2 (P - P_a)}{\rho_l}}$$

où: q = débit instantané de fuite du liquide (g/s)

h = hauteur de la colonne de liquide au-dessus de l'orifice (cm)

P = pression dans la citerne (dynes/cm^2 ou 10^4 kPa)

s = surface de la section de l'orifice (cm^2)
C_q = coefficient de débit (0,8)
ρ_l = masse volumique du liquide (g/cm^3)
g = accélération de la pesanteur (cm/s^2)
P_a = pression atmosphérique ($dynes/cm^2$).

Le coefficient de débit varie avec la forme de l'orifice et le nombre de Reynolds. La plage des valeurs courantes va de 0,6 à 1,0. Comme les orifices résultant de perforations accidentelles ont des formes très variées et que le nombre de Reynolds peut varier considérablement, il a fallu postuler un coefficient de débit, en l'occurrence 0,8, une valeur moyenne.

Prenons par exemple un wagon-citerne standard (2,75 x 13,4 m) rempli de dioxyde de carbone à -23 °C. L'orifice est situé au-dessous du niveau du liquide, dans la paroi inférieure. Le diamètre équivalent de l'orifice est de 150 mm. La pression interne étant de 2200 kPa, quel est le débit instantané de fuite?

h = 275 cm
P = 2200 kPa = $2,2 \times 10^7$ $dynes/cm^2$
s = 177 cm^2
C_q = 0,8
ρ_l = 1,04 g/cm^3
g = 980 cm/s^2
P_a = $1,00 \times 10^6$ $dynes/cm^2$.

Le résultat de l'équation est 951 kg/s ou environ 915 l/s, alors que le résultat de l'approximation graphique faite dans l'Enviroguide *Le dioxyde de carbone* est 900 l/s.

5.2.3.3 Fuite de gaz. - Lorsque l'orifice est situé au-dessus du niveau du liquide, il y a fuite de gaz ou de vapeurs. Le débit de fuite maximal est le débit d'étranglement. Il est rendu par l'équation suivante:

$$q = C_q s P \sqrt{\left(\frac{KM}{RT}\right)\left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}}$$

où: q = débit de fuite des vapeurs
T = température absolue dans la citerne
M = masse moléculaire
R = constante des gaz parfaits
P = pression dans la citerne

K = rapport de la chaleur massique pour le gaz

C_q = coefficient de débit

s = surface de la section de l'orifice.

Voici le critère déterminant le débit d'étranglement:

$$\frac{P}{P_a} > \left(\frac{K+1}{2}\right)^{\frac{K}{K-1}}$$

où: P_a = pression atmosphérique.

Pour qu'il n'y ait pas étranglement, il faut que:

$$\frac{P}{P_a} \leqslant \left(\frac{K+1}{2}\right)^{\frac{K}{K-1}}$$

et le débit de fuite devient alors:

$$q = C_q s \sqrt{2P\rho_v \left(\frac{K}{K-1}\right) \left\{ \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{K+1}{K}} \right\}}$$

où: ρ_v = masse volumique de la vapeur.

5.2.3.4 Relations thermodynamiques. - Lorsque la citerne contient uniquement un gaz:

$$P = \frac{M R_v T}{V}$$

où: M = masse moléculaire

V = volume spécifique du réservoir, m^3/g.

Cette équation permet de calculer la diminution de pression due à l'échappement du gaz en conditions isothermes. En présence de liquide, en conditions isothermes, l'équation devient:

$$P = P_{sat}(T) = a, e^{\frac{-b}{T}}$$

où: $P_{sat}(T)$ = pression de vapeur à saturation à la température T

$a, e^{\frac{-b}{T}}$ = constantes.

Le débit de fuite demeure constant jusqu'à épuisement du liquide.

Par exemple, considérons un wagon-citerne rempli de dioxyde de carbone à -23 °C, ayant dans la partie supérieure un orifice dont le diamètre équivalent est de 250 mm. Quel est le débit de fuite instantané pour une pression interne de 2200 kPa?

P_a = 100 kPa = $1,0 \times 10^6$ dynes/cm^2
P = 2200 kPa = $2,2 \times 10^7$ dynes/cm^2
s = 491 cm^2
C_q = 0,8
K = $1/(1-(1,986/M \cdot C))$ = 1,30
M = masse moléculaire = 44,01
C = capacité calorifique du gaz, cal/(g · °C)

$$\frac{P}{P_a} = 22$$

$$\left(\frac{K+1}{2}\right)^{\frac{K}{K-1}} = 1,83$$

Il y a donc étranglement:

R_v = constante des gaz parfaits/masse moléculaire
= $1,89 \times 10^6$.

Le débit de fuite est de 266 kg/s en comparaison de l'approximation de 250 kg/s obtenue avec le graphique de l'Enviroguide.

5.3 Diffusion dans l'atmosphère

5.3.1 Aperçu et objectifs. - La diffusion dans l'atmosphère de gaz dangereux émis à l'occasion d'un accident constitue un problème important. Alors que les effets néfastes possibles d'une substance dangereuse dans l'eau ou dans le sol ne sont généralement ni immédiats ni violents, les effets néfastes d'une diffusion dans l'atmosphère peuvent être immédiats et graves. Un feu ou une explosion peuvent détruire des pâtés de maisons et parfois tuer beaucoup de gens; par ailleurs, des vapeurs toxiques peuvent faire de nombreuses victimes en quelques minutes ou en quelques heures. La diffusion dans l'atmosphère est beaucoup plus rapide que dans l'eau ou dans le sol et si l'on ajoute à cela la possibilité qu'il y ait inflammation de vapeurs ou inhalation de gaz toxiques ou asphyxiants, on comprend qu'il en résulte une urgence beaucoup plus grande.

Le problème portant sur la diffusion de vapeurs dangereuses vise à faciliter la prévision de l'étendue de la zone de risque d'inflammation ou d'intoxication du côté sous le vent, compte tenu des conditions régnantes. Les principaux facteurs déterminant la superficie de la zone dangereuse sont:

a) La source (le produit chimique, le type d'émission, la masse émise, le débit d'émission et la durée totale de l'émission);
b) Les conditions météorologiques;
c) Le relief.

Il faut tenir compte de ces facteurs lorsqu'on évalue la diffusion d'un polluant dans l'atmosphère. La présente section a pour objet de décrire les modèles de diffusion et les techniques correspondantes employées dans la collection "Enviroguide" pour préparer les nomogrammes et les modèles prévisionnels de diffusion.

5.3.2 Besoins d'information. - En cas d'accident, l'une des tâches les plus difficiles consiste habituellement à obtenir rapidement une information adéquate au sujet de la source. Le type d'émission varie selon le produit, la façon dont il est stocké et le type d'orifice. Ce dernier peut avoir une forme très irrégulière et peut être situé n'importe où dans la paroi de la citerne (p. ex. au-dessus ou au-dessous du niveau du liquide).

À une fuite de gaz correspond un point source; à l'évaporation d'un liquide étalé sur le sol ou l'eau après un déversement correspond une aire source. Dans les deux cas, les émissions sont "semi-continues"; par ailleurs, une catastrophe (par exemple une explosion) pourrait libérer "instantanément" une bouffée de gaz. L'étude de cas concrets d'accidents a indiqué que cette seconde catégorie d'émission, c'est-à-dire la libération en un court laps de temps d'une grande quantité de vapeurs, est nettement la plus importante (McQuaid, 1979).

La masse émise et le débit d'émission sont des paramètres importants, difficiles à évaluer de façon précise à l'occasion d'accidents réels. Le débit d'émission de vapeurs dans l'atmosphère, soit à partir d'un récipient, soit par évaporation d'une nappe de liquide, est un paramètre très important. L'*Hazard Assessment Handbook* (CHRIS, 1974) contient certaines directives et données sur l'évaluation de la puissance d'une source en cas de fuites de récipients. Les publications suivantes, Esso (1972), Leinonen et McKay (1975) ainsi que Fleischer (1980), présentent certaines données et suggèrent certaines méthodes pour calculer la vitesse d'évaporation d'un liquide répandu. Ces articles ne font qu'effleurer le problème de la "configuration" de la source, un domaine où d'autres recherches s'imposent (McQuaid, 1979).

Une fois les vapeurs dangereuses émises dans l'atmosphère, leur transport et leur diffusion sont déterminés surtout par la vitesse et la direction du vent et par la force des tourbillons. Bien que ces paramètres soient très variables et par conséquent difficiles à prévoir, il y a certaines façons pratiques de classer les conditions atmosphériques en catégories indiquant la capacité de l'atmosphère à diffuser les polluants.

D'une part, les turbulences atmosphériques sont intimement reliées à la température; d'autre part, il est beaucoup plus difficile de mesurer les turbulences atmosphériques que les gradients verticaux de température qui les accompagnent. C'est pourquoi les météorologues qui étudient les phénomènes de diffusion (ou la pollution atmosphérique) se servent fréquemment de ces gradients pour déterminer la stabilité et la capacité de diffusion de l'atmosphère.

La figure 2 décrit divers profils verticaux de température ainsi que les trois grandes catégories de stabilité atmosphérique: instable, indifférente, stable. En atmosphère indifférente, il y a une diminution de la température en fonction de la hauteur d'environ 10 °C/km (dit gradient adiabatique de température). En atmosphère instable (c'est-à-dire pour un gradient de température plus important), de fortes turbulences diffusent rapidement les polluants; en atmosphère stable, il y a peu de turbulence, donc faible diffusion des polluants. Les substances émises dans une atmosphère stable sont entraînées avec le vent sous forme d'un mince filet qui n'est pas modifié sur plusieurs dizaines de kilomètres. Par conséquent, en cas de déversement d'une substance dangereuse, une atmosphère stable combinée à de faibles vents est la plus à craindre.

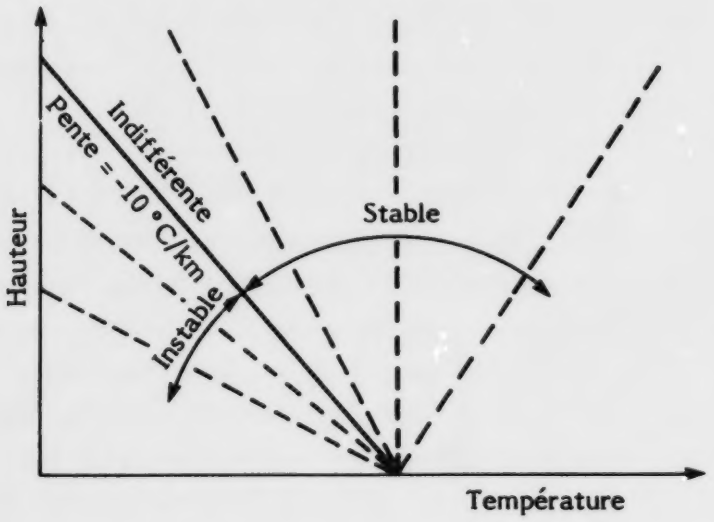


Figure 2 STABILITÉ ATMOSPHÉRIQUE ET GRADIENT VERTICAL DE TEMPÉRATURE

Le relief peut influer énormément sur le transport et la diffusion de gaz dangereux, surtout s'ils sont plus lourds que l'air (par exemple le chlore). La canalisation des vents dans les vallées peut entraîner le transport de gaz sur des distances considérables sans trop de diffusion latérale. Par vent faible, la pente du terrain a un effet important sur l'écoulement de l'air. En cas de dégagement d'un gaz froid, le refroidissement de certains éléments du relief entraîne des écoulements de pente, révélés par des études en soufflerie (Hall et coll., 1974) et des observations faites à l'occasion d'un accident (Booj, 1979). Une des actions du relief à craindre est l'emprisonnement d'un gaz lourd dans des dépressions où de fortes teneurs peuvent persister pendant une période assez longue.

5.3.3 Modèles de diffusion. - L'élaboration de modèles de diffusion des vapeurs dangereuses émises dans l'atmosphère est une tâche complexe. En faisant des hypothèses simplificatrices quant au comportement physique et chimique des substances dangereuses, il est possible d'utiliser les modèles décrits dans le présent texte pour évaluer la diffusion des vapeurs. Ces modèles sont ceux dont l'usage est le plus répandu pour prévoir les teneurs en gaz. Il est important de comprendre les hypothèses et les limites inhérentes aux modèles avant d'appliquer ces derniers à une situation particulière.

Dans les Enviroguides, on considère que l'émission accidentelle de vapeurs de produits chimiques transportés par wagons-citernes ou camions-citernes peut se produire de deux façons:

a) Émission directe de vapeurs (lorsque le produit chimique est à l'état gazeux ou lorsque la perforation se produit dans la paroi supérieure d'un wagon-citerne ou d'un camion-citerne contenant un liquide);

b) Déversement d'un liquide (lorsque la paroi inférieure d'un wagon-citerne ou d'un camion-citerne contenant un liquide est perforée) avec formation d'une nappe sur le sol ou à la surface de l'eau et émission de vapeurs dans l'atmosphère par suite de l'évaporation du produit.

Pour évaluer les teneurs sous le vent par rapport au lieu d'un accident et déterminer ainsi la zone de risque d'inflammation ou d'intoxication, la diffusion atmosphérique est modélisée selon le modèle bouffée ou selon le modèle panache, d'après la décision à laquelle mène l'arbre de la figure 3. Une fuite de gaz à partir d'une citerne est assimilée à un point source à émission semi-continue semblable à un panache; en revanche, la fuite d'une grande quantité de vapeurs en quelques secondes ou quelques minutes est assimilée à un point source à émission instantanée de type bouffée. Dans le cas d'un déversement donnant une nappe de liquide qui s'évapore "lentement" à la surface du sol ou de l'eau, la nappe est considérée comme une aire source à émission continue ou semi-continue à laquelle le modèle panache s'applique. Dans le cas du déversement d'un liquide très volatil (vitesse d'évaporation très grande), le modèle bouffée s'applique.

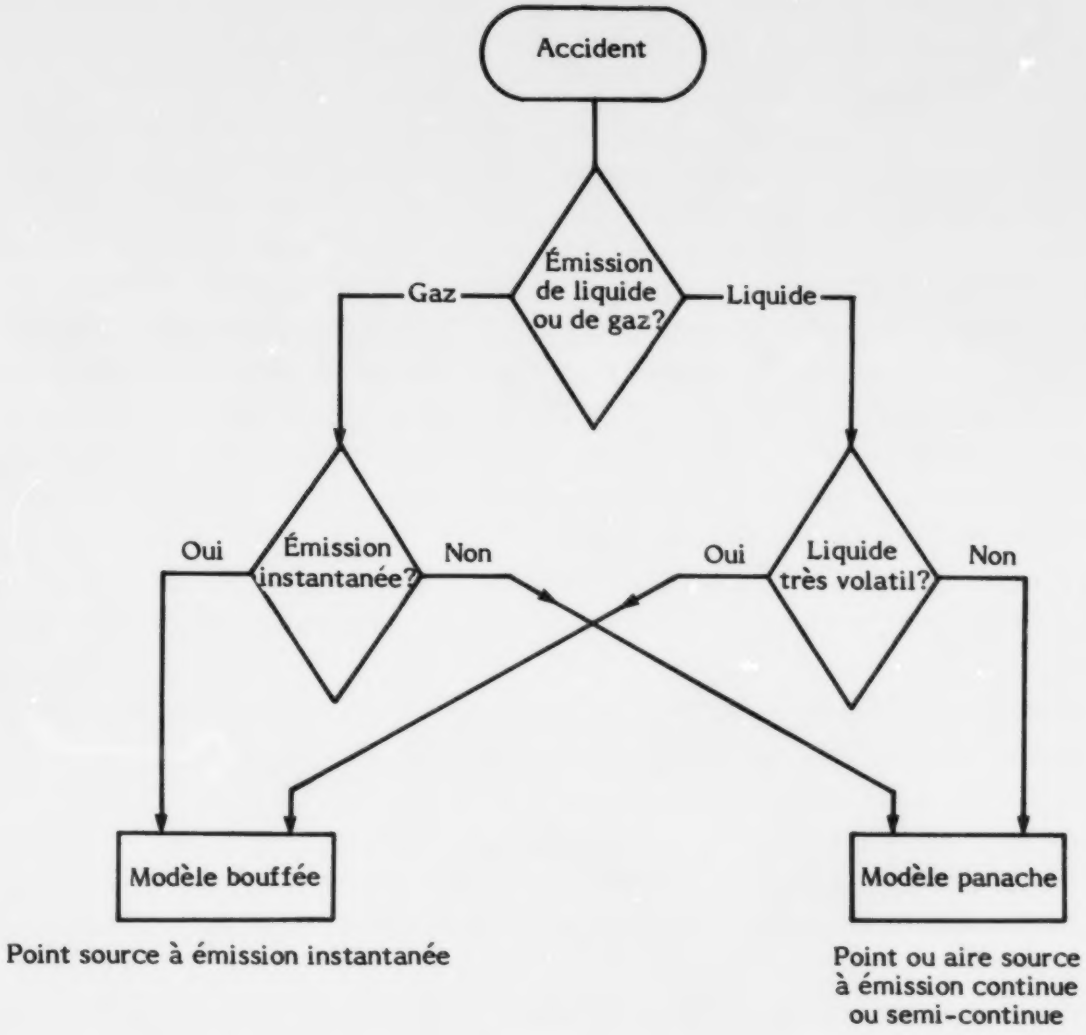


Figure 3 ARBRE SERVANT AU CHOIX DU MODÈLE

Les modèles présentés ici sont basés sur des modèles gaussiens comme celui de Pasquill (1974) et d'autres (Slade, 1968; Turner, 1970); ils sont utilisés dans l'*Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook* du U.S. Coast Guard (Raj, 1974; Rausch, 1977). L'origine des coordonnés x, y et z est le sol situé directement sous le point source, ou le centre, au sol, de l'aire source recouverte par le produit déversé. L'axe des x représente la direction du vent et l'axe des z, la verticale ou l'altitude (figure 4).

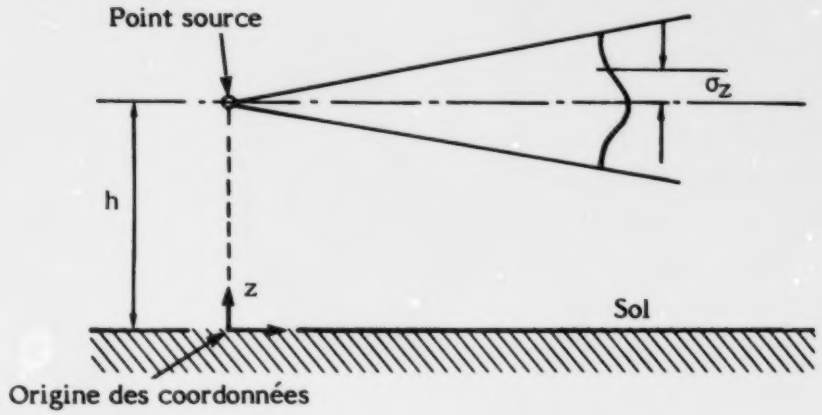


Figure 4 SCHÉMA D'UN POINT SOURCE À ÉMISSION CONTINUE

5.3.3.1 Hypothèses. - Les équations décrivant les modèles bouffée et panache sont décrites aux pages suivantes; voici les hypothèses sur lesquelles elles sont basées:

a) La densité des vapeurs émises est la même que celle de l'air ambiant, c'est-à-dire que le nuage de vapeurs n'est soumis à aucun mouvement important causé par la gravité ou par la poussée ascendante de l'air qu'il déplace;
b) Dans tout le nuage, les vapeurs se mélangent uniformément avec l'air;
c) La teneur obtenue est pondérée dans le temps;
d) Le vent est uniforme sur toute l'étendue verticale du nuage;
e) Le relief est plat (il n'y a aucune action du relief);
f) La bouffée ou le panache ne subissent aucune perte de masse (p. ex. par retombées);
g) L'élévation de la bouffée ou du panache n'est pas limitée par une couche de mélange.

5.3.3.2 Données nécessaires. - Les données suivantes sont nécessaires:

- conditions météorologiques (catégories de stabilité de l'atmosphère);
- vitesse et direction du vent;
- coordonnées (par rapport à la source des vapeurs) du point où la teneur est calculée;
- débit d'émission des vapeurs dans le cas d'un panache; masse totale de vapeurs émises dans le cas d'une bouffée;
- superficie de l'aire source.

5.3.3.3 Modèle de panache. - Dans le cas de vapeurs émises de façon continue à débit constant par un point source situé à une hauteur h, la teneur au point x, y, z sous le vent par rapport à la source est donnée par l'équation gaussienne suivante représentant un panache:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-1/2 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{\exp\left[-1/2 \left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-1/2 \left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \quad (1)$$

lorsque $x \leqslant ut$ et $T(x, y, z, t) = 0$ lorsque $x > ut$

où:

- T = teneur en vapeurs (g/m^3)
- q = débit d'émission des vapeurs (g/s)
- u = vitesse du vent (m/s)
- x = distance sous le vent (m)
- y = distance transversale à la direction du vent (m)
- z = altitude (ou distance verticale) (m)
- h = hauteur de la source (m)
- σ_y, σ_z = écarts-types de la répartition gaussienne des teneurs sous le vent et à la verticale (voir les figures 6 et 7) (m)
- t = temps écoulé depuis le moment de l'émission (s)

Pour une émission provenant d'une nappe à la surface du sol (h = 0), la teneur au sol (z = 0) dans la direction de l'axe (y = 0) du panache, est donnée par l'équation suivante, obtenue par simplification de l'équation 1 :

$$T(x, 0, 0, t) = \begin{cases} \dfrac{q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} & x \leqslant ut \quad (2) \\ 0 & x > ut \quad (3) \end{cases}$$

C'est à partir de cette équation que les nomogrammes donnant la teneur uniformisée (Tu/q) en fonction de la distance sous le vent x ont été préparés pour chaque substance dont la fuite est susceptible de donner lieu à la formation d'un panache engendré par une émission continue.

Dans le cas d'une aire source à émission continue, la méthode rigoureuse servant à déterminer la teneur en un point donné consiste à additionner les contributions de chaque point

source infinitésimal de la zone touchée. Il s'agit donc d'évaluer une intégrale, ce qui pose des difficultés d'application. Lorsqu'il s'agit d'évaluer des teneurs à grande distance (plus que deux fois le diamètre équivalent de l'aire source), le traitement simplifié suivant suffit dans la plupart des cas.

L'aire source est assimilée à un point source théorique dont la puissance d'émission totale est la même, mais qui est déplacé au vent d'une distance x_y comme le montre la figure 5. Cette distance est fonction de la teneur et elle est évaluée en posant comme égales l'étendue transversale de l'aire source (dans le sens perpendiculaire au vent), c'est-à-dire son diamètre D, et la largeur du panache ($4{,}3\ \sigma_{y_0}$, soit la limite du panache où la teneur est réduite à 10 p. 100) sous le vent par rapport au point source théorique. Il s'agit de calculer σ_{y_0} et, à l'aide de la figure 6, de déterminer la distance x_y correspondant à ce taux d'élargissement du panache (Turner, 1970). Dans le cas de l'aire source, il faut donc procéder à la substitution suivante au moment des calculs:

$$x' = x + x_y \qquad (4)$$

Lorsque x_y est inférieur à 100 m (ce qui est en dehors de la plage de la figure 6) ou qu'il est impossible d'utiliser les relations ou les courbes donnant σ_y en fonction de x, l'approximation grossière qui suit est suggérée (Raj, 1977):

$$x' = x + 5D \qquad (5)$$

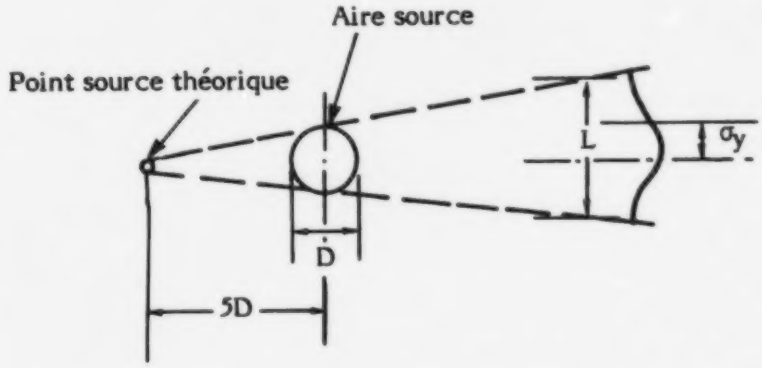


Figure 5 AIRE SOURCE À ÉMISSION CONTINUE ASSIMILÉE À UN POINT SOURCE THÉORIQUE

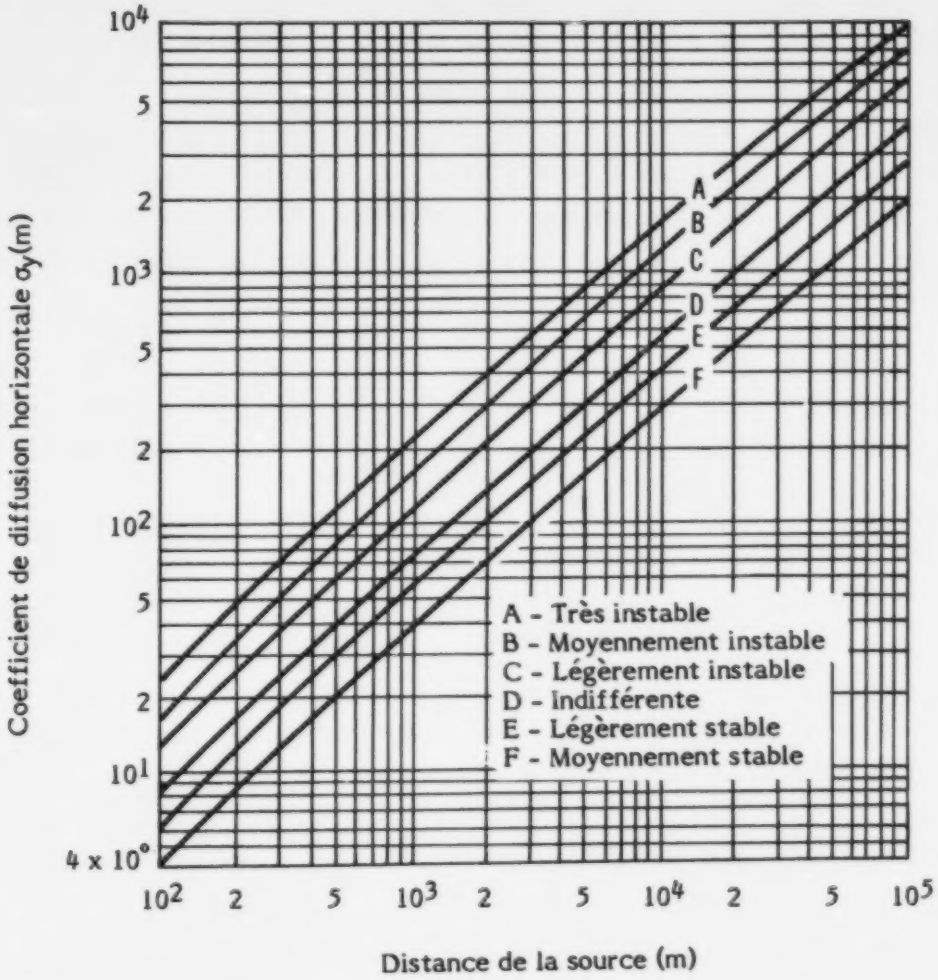


Figure 6 DIFFUSION HORIZONTALE σ_y EN FONCTION DE LA DISTANCE SOUS LE VENT À PARTIR DE LA SOURCE, POUR LES SIX CATÉGORIES DE STABILITÉ DE PASQUILL (Slade, 1968)

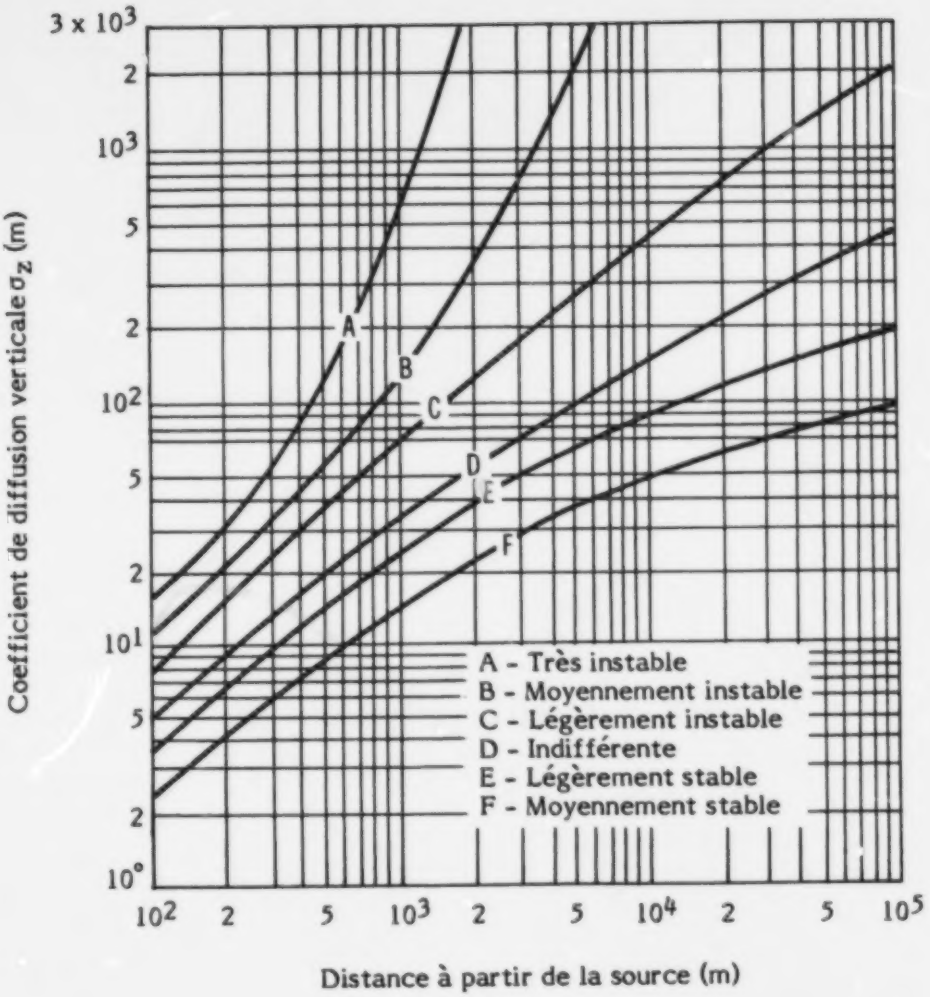


Figure 7 DIFFUSION VERTICALE σ_z EN FONCTION DE LA DISTANCE SOUS LE VENT À PARTIR DE LA SOURCE, POUR LES SIX CATÉGORIES DE STABILITÉ DE PASQUILL (Slade, 1968)

5.3.3.4 Modèle de bouffée. - L'équation suivante donne la teneur au temps t en un point (x, y, z) situé sous le vent par rapport à une bouffée, c.-à-d. un nuage libéré instantanément (par exemple lorsque la paroi d'une citerne contenant du gaz sous pression cède soudainement):

$$T(x, y, z, t) = \frac{2\, m_e}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-1/2 \left(\frac{x - ut}{\sigma_x}\right)^2\right] \exp\left[-1/2 \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \tag{6}$$

$$\exp\left[-1/2\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-1/2 \left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right].$$

Pour le calcul des teneurs la direction de l'axe (y = 0) de la bouffée au niveau du sol (z = 0), pour une émission provenant d''une nappe à la surface du sol (h = 0), l'équation 6 devient:

$$T(x, 0, 0, t) = \frac{4\, m_e}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-1/2 \left(\frac{x - ut}{\sigma_x}\right)^2\right] \tag{7}$$

où:

m_e = masse totale de vapeurs émises (kg)

T = teneur résultant d'une émission instantanée (km/m^3)

u = vitesse du vent (m/s)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = coefficients de diffusion (élargissement) de la bouffée (m)

x, y, z = coordonnées cartésiennes avec la source d'émission à l'origine. On suppose que le vent souffle dans la direction positive de l'axe des x; y est la coordonnée transversale (au vent) et z, la coordonnée verticale (altitude).

Dans le présent ouvrage, on suppose que les relations décrivant les coefficients de diffusion de la bouffée sont les mêmes que les coefficients σ de Pasquill pour un panache ($\sigma_x = \sigma_y$). Slade (1968) donne d'autres relations possibles. Les calculs de la teneur uniformisée (T/m_e) en fonction de la distance sous le vent x sont préparés pour chaque substance dont la fuite donne lieu à une bouffée en se servant de l'équation 7 et des coefficients σ.

5.3.3.5 Largeur du panache ou de la bouffée. - Il est possible de calculer la largeur de la section d'un panache ou d'une bouffée dont la teneur est supérieure à une valeur déterminée T* au niveau du sol, en faisant le rapport de la teneur T axiale au niveau du sol et de la teneur T* en question en un point x situé au niveau du sol hors de l'axe. Par exemple, pour le modèle du panache:

$$\frac{T}{T^*} = \exp\left[-1/2\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \tag{8}$$

en résolvant pour y (demi-largeur du panache), on obtient:

$$y = \sqrt{2\sigma_y}\sqrt{\text{log nat.}\left(\frac{T}{T^*}\right)}\ . \tag{9}$$

La largeur du panache (L = 2y) est donc donnée par:

$$L = 2\sqrt{2\sigma_y}\sqrt{\text{log nat.}\left(\frac{T}{T^*}\right)}\ . \tag{10}$$

Note: si $T^*/T=1/10$, alors $L = 4{,}3\,\sigma_y$.

Comme on suppose que la vitesse de diffusion (σ) est la même pour un panache et pour une bouffée, la largeur d'une bouffée est donc elle aussi décrite par l'équation 10.

5.3.4 Nomogrammes de la diffusion des vapeurs. - La présente section comporte les nomogrammes et tableaux suivants:

a) Débit d'émission des vapeurs en fonction du rayon maximal de la nappe;
b) Teneur uniformisée en vapeurs en fonction de la distance sous le vent;
c) Demi-largeur maximale du panache (ou de la bouffée) de vapeurs dangereuses;
d) Distance parcourue par le panache (ou la bouffée) en fonction du temps écoulé.

5.3.4.1 Débit d'émission des vapeurs en fonction du rayon de la nappe. - Le débit d'émission de vapeurs d'une substance formant une nappe liquide lorsqu'elle est déversée sur le sol ou à la surface de l'eau est donnée par la relation de Stiver et Mackay (1982):

$$q = KAP_vM/RT \tag{11}$$

où: q = débit d'émission (vitesse d'évaporation (g/s))
K = coefficient de transfert de matière (m/s)

A = aire (m^2)

P_v = pression de vapeur (Pa)

M = masse moléculaire (g/mole)

R = constante des gaz parfaits, 8,314 (PA)m^3/(mole · K)

T = température (K).

Le coefficient de transfert de masse K de Mackay et Matsugu (1973) est donné par:

$$K = 0{,}0048\, u^{0,78}\, D^{-0,11}\, Sc^{-0,67} \qquad (12)$$

où: u = vitesse du vent (m/s)

D = diamètre de la nappe (m)

Sc = nombre de Schmidt pour la phase gazeuse (sans dimension).

Pour les fins du présent manuel, on utilise une approximation de l'équation (12) proposée par Stiver et Mackay (1982):

$$K = 0{,}002\, u^{0,78}. \qquad (13)$$

Cette approximation a été obtenue en faisant égaler $D^{-0,11}$ à l'unité et Sc à 2,7 (ce qui est une valeur typique dans le cas d'hydrocarbures dans des conditions environnementales). En remplaçant u dans l'équation 13 par une valeur de 4,5 m/s, soit 16 km/h, ce qui est à peu près la vitesse annuelle moyenne du vent au Canada (Environnement Canada, 1975), on obtient K = 0,0065 m/s. En substituant cette valeur dans l'équation 11, le taux d'évaporation (par mètre carré) à une température de 20 °C est donnée par l'équation suivante:

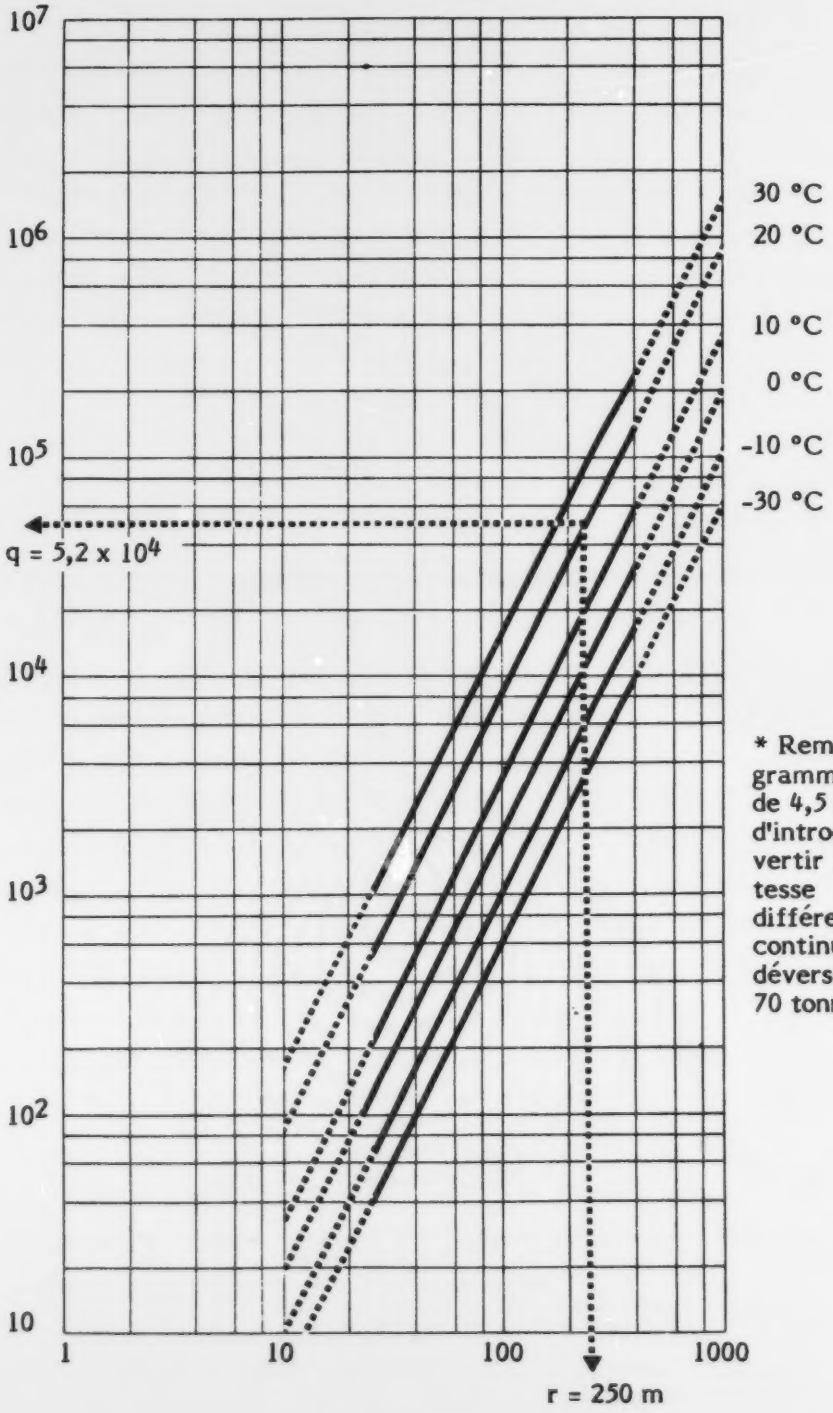
$$E = \frac{q}{A} = 2{,}65 \times 10^{-6} \times P_v \times M \ (g/m^2 s). \qquad (14)$$

On considère que cette formule s'applique aux corps purs dont le point d'ébullition est supérieur d'au moins 50 à 60 °C à la température ambiante (c.-à-d. aux produits chimiques dont le point d'ébullition est supérieur à 70-80 °C). Les corps à point d'ébullition plus bas s'évaporent plus lentement que prévu par l'équation 14 à cause de l'effet de refroidissement dû à l'évaporation. La limite supérieure d'applicabilité de l'équation 14 correspond donc à un taux d'évaporation d'environ 20 g/(m^2s). L'équation 14 a servi à établir les nomogrammes donnant le débit d'émission des vapeurs en fonction du rayon de la nappe. La figure 8 est un exemple d'application à l'éthylbenzène.

Le taux d'évaporation à une température différente de 20 °C est calculé en se servant du rapport entre la pression de vapeur du corps à cette température et la pression de vapeur du corps à 20 °C et du rapport entre les deux températures. Comme le taux massique

Figure 8

ÉTHYLBENZÈNE **DÉBIT D'ÉMISSION DES VAPEURS À DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES* EN FONCTION DU RAYON DE LA NAPPE**



* Remarque. - Le nomogramme vaut pour un vent de 4,5 m/s. Voir le manuel d'introduction pour convertir les valeurs si la vitesse du vent est différente. Les segments continus représentent des déversements de 0,2 à 70 tonnes.

d'évaporation est directement proportionnel à la pression de vapeur et inversement proportionnel à la température absolue, le taux d'évaporation à une température différente de 20 °C est calculé en se servant de l'équation suivante:

$$E_t = E_{20°C} \times \frac{P_{vt}}{P_{20°C}} \times \frac{293}{T_t} \qquad (15)$$

où l'indice t représente la température à laquelle on souhaite connaître le taux d'évaporation.

Les nomogrammes donnant le débit d'émission des vapeurs en fonction du rayon de la nappe de liquide sont basés sur le taux d'évaporation lorsque la vitesse du vent est de 4,5 m/s; ils ne peuvent donc être utilisés, lorsque la vitesse du vent est différente, que pour donner une approximation du débit d'émission des vapeurs. Pour évaluer le débit d'émission des vapeurs à différentes vitesses du vent, on peut utiliser l'équation suivante:

$$q_u = q_{4,5} \times \frac{u^{0,78}}{4,5^{0,78}} \qquad (16)$$

où u représente la vitesse du vent pour laquelle on souhaite connaître le débit d'émission des vapeurs.

5.3.4.2 Teneur uniformisée en vapeurs en fonction de la distance sous le vent. - La figure 9 est un exemple de nomogramme donnant la teneur uniformisée (calculée à l'aide de l'équation 2) au niveau du sol dans la direction de l'axe du panache (Tu/q) en fonction de la distance sous le vent x pour les catégories de stabilité atmosphérique D et F. Comme l'indiquent les figures 6 et 7 (qui sont utilisées pour les deux modèles, c'est-à-dire panache et bouffée), il est possible de diviser la stabilité atmosphérique en six catégories allant de très instable (A) à moyennement stable (F). En pratique, les nomogrammes ne prévoient que les catégories D et F. La catégorie F est la moins favorable à la diffusion des vapeurs et la catégorie D est la plus fréquente dans la majeure partie du Canada. Un observateur sur le terrain peut distinguer ces catégories selon les conditions météorologiques régnantes.

Tableau 3
Catégories de stabilité atmosphérique

Catégorie F	Catégorie D
Vitesse du vent < 11 km/h (3 m/s) et l'une ou l'autre des conditions suivantes: ciel couvert durant le jour; nuit; forte inversion de température	La plupart des autres conditions (vents et météo)

En se servant de la figure 9, il est possible d'effectuer les calculs suivants:

1) Connaissant q, u et la catégorie de stabilité, il est possible de déterminer la teneur pour toute distance x sous le vent, dans le cas d'émissions provenant d'un point source; dans le cas d'émissions provenant d'une aire source, il faut modifier la distance d'une valeur - x_y(=5D).
2) Connaissant q, u, la catégorie de stabilité et la teneur dangereuse limite (soit la plus faible des valeurs suivantes: *Threshold Limit Value* (TLV•) ou limite inférieure d'inflammabilité), il est possible de déterminer la distance dangereuse sous le vent.
3) Connaissant u, la catégorie de stabilité et la teneur dangereuse limite, il est possible de calculer le débit maximal d'émission de vapeurs pour lequel la teneur restera inférieure à la teneur dangereuse limite au-delà d'une distance donnée sous le vent.

La figure 10 est un exemple de nomogramme établi à partir de l'équation 9, pour une bouffée. Les courbes représentent les valeurs maximales de T/m_e en fonction de la distance sous le vent et de la catégorie de stabilité atmosphérique. Ces valeurs expriment les teneurs uniformisées maximales observables en tout point donné x sur la trajectoire de la bouffée.

5.3.4.3 Tableaux de la largeur de la zone dangereuse du panache ou de la bouffée. - Le tableau 4 donne la demi-largeur maximale L/2 max. (calculée d'après l'équation 10) du panache au niveau du sol en fonction de q/u pour les catégories de stabilité D et F, et pour une teneur dangereuse limite, soit T*, égale à 1000 ppm (4,35 g/m^3) (10 fois la TLV• de l'éthylbenzène).

Pour une catégorie de stabilité donnée, il est possible de déterminer, pour tout rapport q/u, la demi-largeur maximale du panache d'éthylbenzène gazeux à 20 °C. Cette demi-largeur maximale est utilisée avec la distance dangereuse maximale pour délimiter la zone dangereuse. À la figure 11, le pointillé détermine la forme type de la zone dangereuse pour un vent de 270° (ouest). La zone délimitée par le tireté, qui est définie par L/2 et par x, devrait servir à déterminer la zone dangereuse. Lorsque le vent varie, ce qui est souvent le cas, et que des vents de 270° ± 10° sont observés ou prévus, alors la zone dangereuse est déterminée par le tireté de la figure 12. Le pointillé délimite la zone où des teneurs dangereuses sont prévues.

5.3.4.4 Distance parcourue par le panache (ou la bouffée) en fonction du temps écoulé. - La figure 13 représente la distance x_t parcourue par le panache en fonction du temps écoulé t pour diverses vitesses du vent u. Il s'agit simplement de la représentation graphique de la relation $x_t = ut$ pour une plage de vitesses du vent types.

Le temps t écoulé depuis le déversement et la vitesse du vent u étant connus, il est possible de trouver, grâce à la figure 13, la distance x_t sous le vent parcourue par le panache.

Figure 9

ÉTHYLBENZÈNE

TENEUR UNIFORMISÉE EN VAPEURS
EN FONCTION DE LA DISTANCE SOUS LE VENT

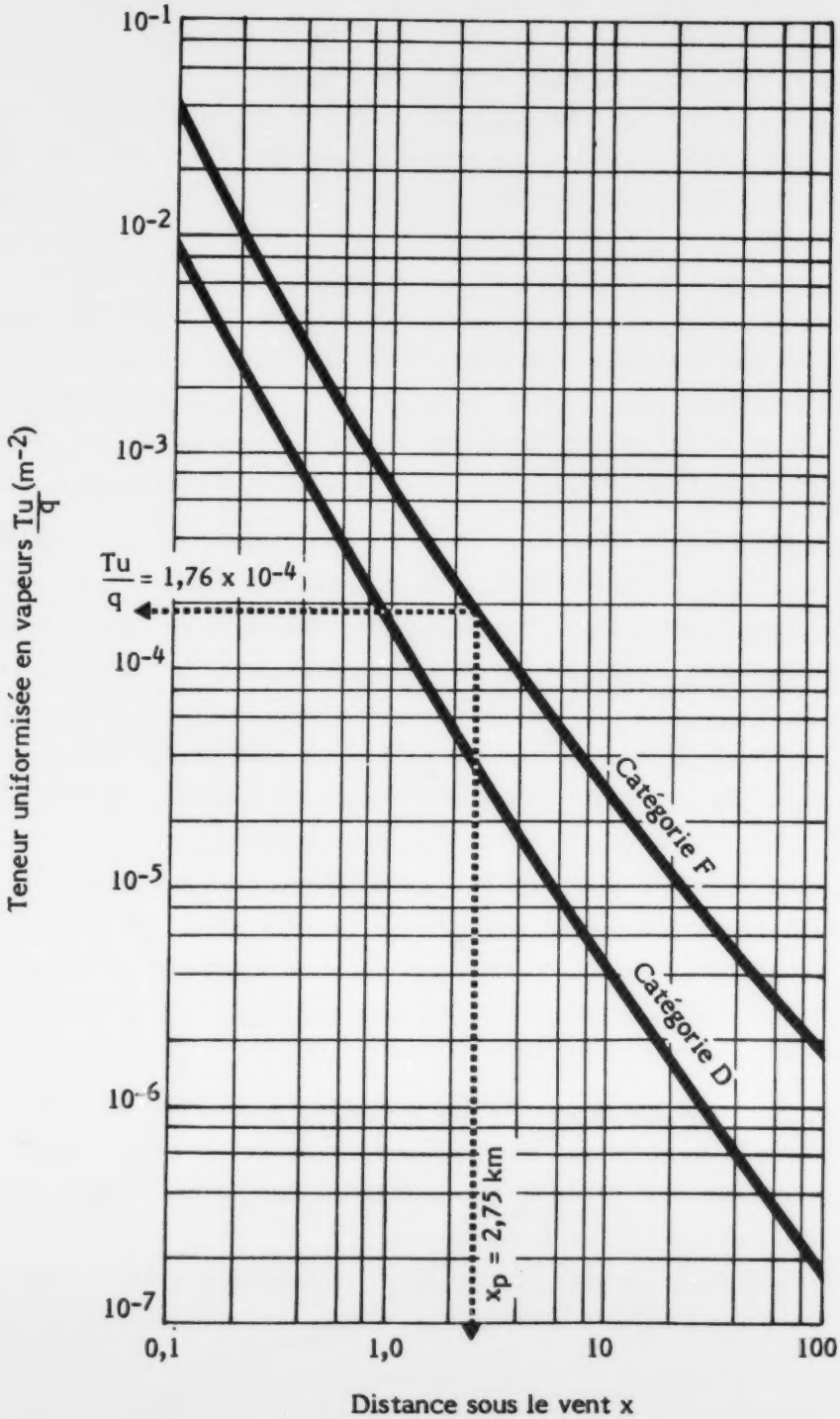
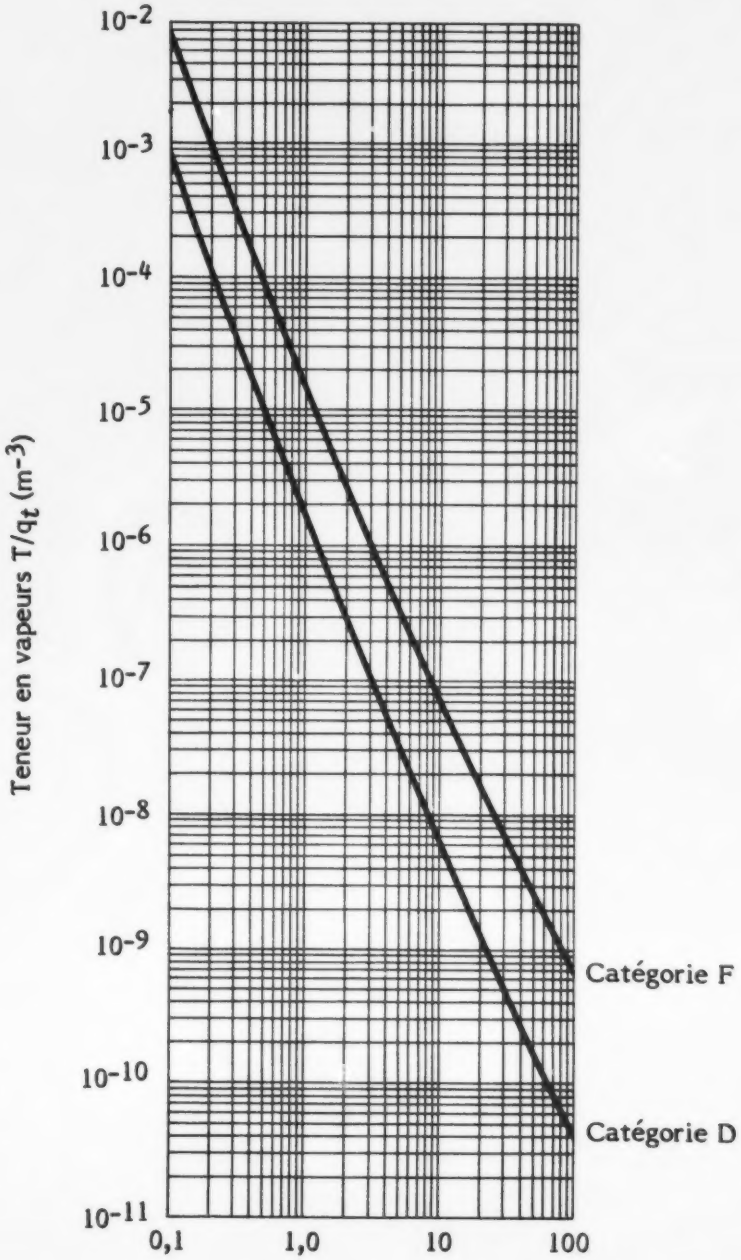


Figure 10

ÉTHYLBENZÈNE

TENEUR EN VAPEURS
EN FONCTION DE LA DISTANCE SOUS LE VENT



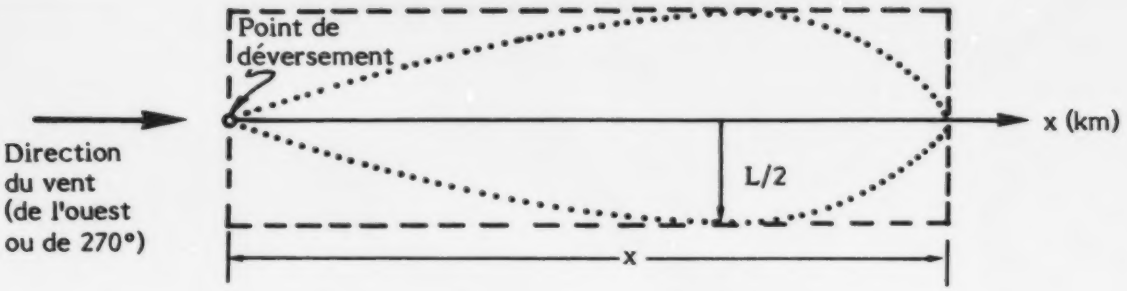


Figure 11 SCHÉMA DE LA ZONE DANGEREUSE POUR UN VENT DE 270°

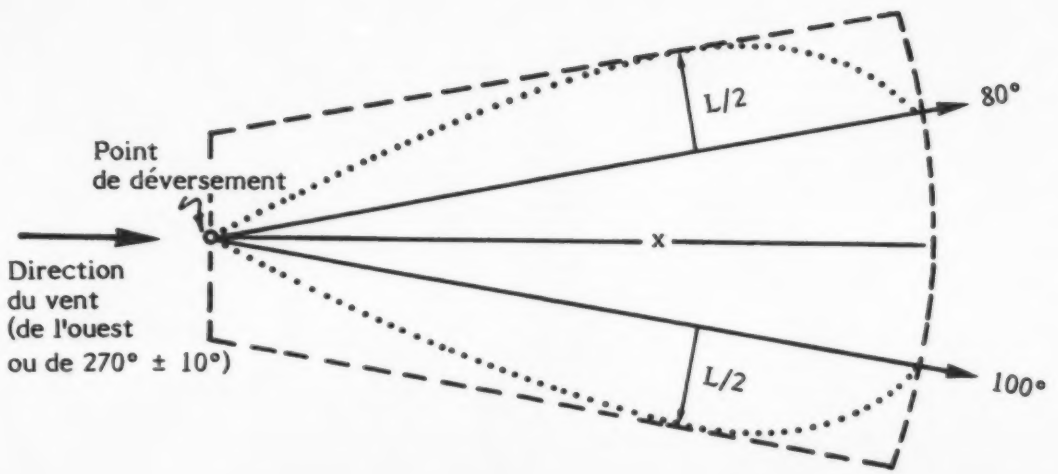


Figure 12 SCHÉMA DE LA ZONE DANGEREUSE POUR UN VENT DE 270° ± 10°

Figure 13

ÉTHYLBENZÈNE

DISTANCE PARCOURUE PAR LE PANACHE EN FONCTION DU TEMPS ÉCOULÉ

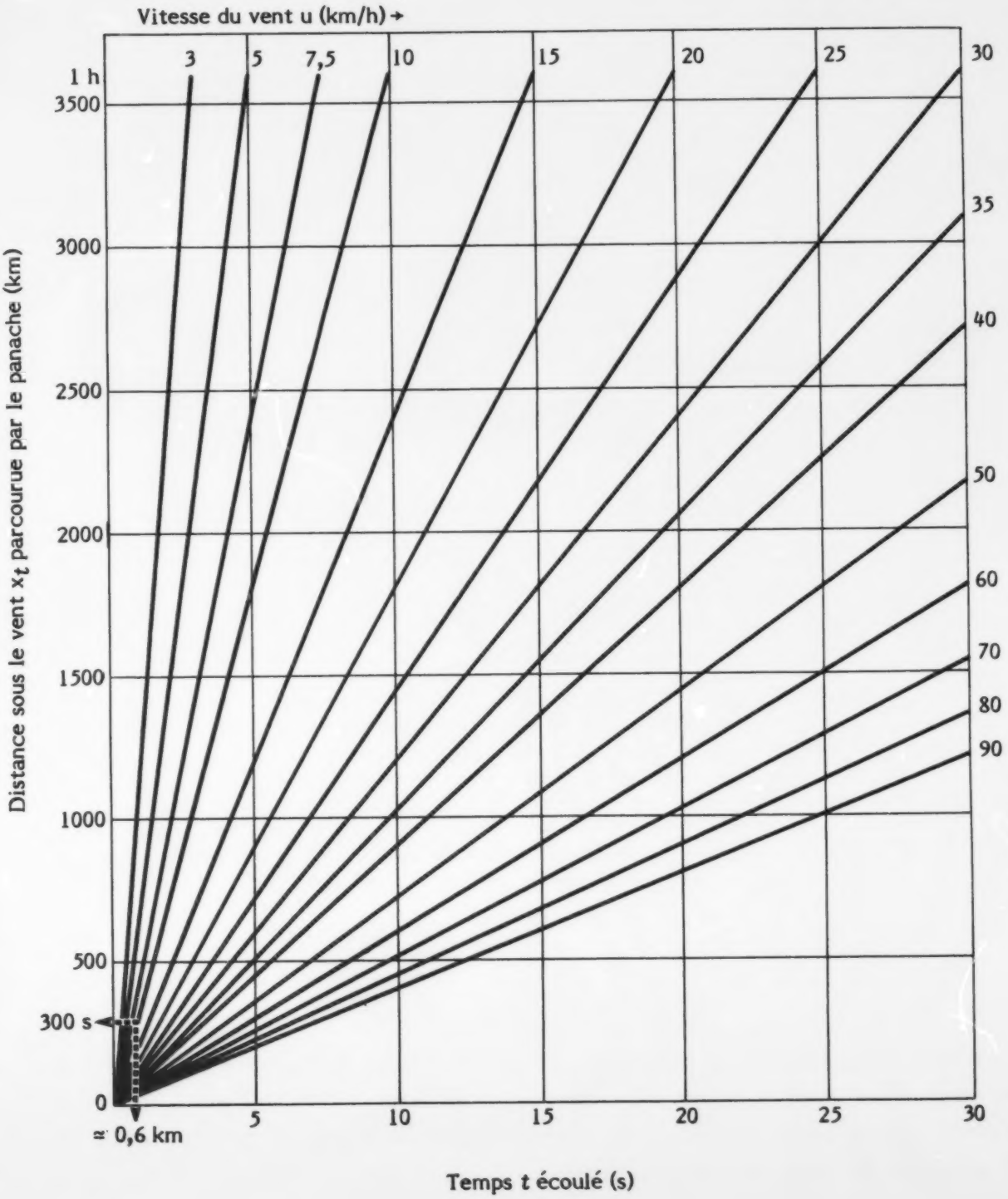


Tableau 4
Demi-largeur maximale du panache dangereux de vapeurs d'éthylbenzène (à 20 °C)

Catégorie de stabilité D			Catégorie de stabilité F		
q/u (g/m)	L/2 max. (m)		q/u (g/m)	L/2 max. (m)	
30 000 000	3400 x ⩽ 99,5 km*		2 500 000	1385 x ⩽ 99,5 km*	
25 000 000	3030		2 000 000	1175	
20 000 000	2640		1 500 000	985	
15 000 000	2210		1 000 000	700	
10 000 000	1720		750 000	565	
8 000 000	1500		500 000	420	
6 000 000	1255		400 000	350	
5 000 000	1120		300 000	295	
3 000 000	815		250 000	260	
2 500 000	730		200 000	225	
2 000 000	635		150 000	190	
1 500 000	540		100 000	145	
1 000 000	425		50 000	95	
750 000	360	q/u = 24 760 →	25 000	60	→ L/2 max. = 60 m
500 000	285		20 000	50	
400 000	250		10 000	35	
300 000	210		5 000	25	
200 000	165		1 000	10	
150 000	140				
100 000	110				
50 000	75				
25 000	50				
10 000	32				
5 000	20				
1 000	10				

* Les valeurs de demi-largeur valent jusqu'à une distance de 100 km.

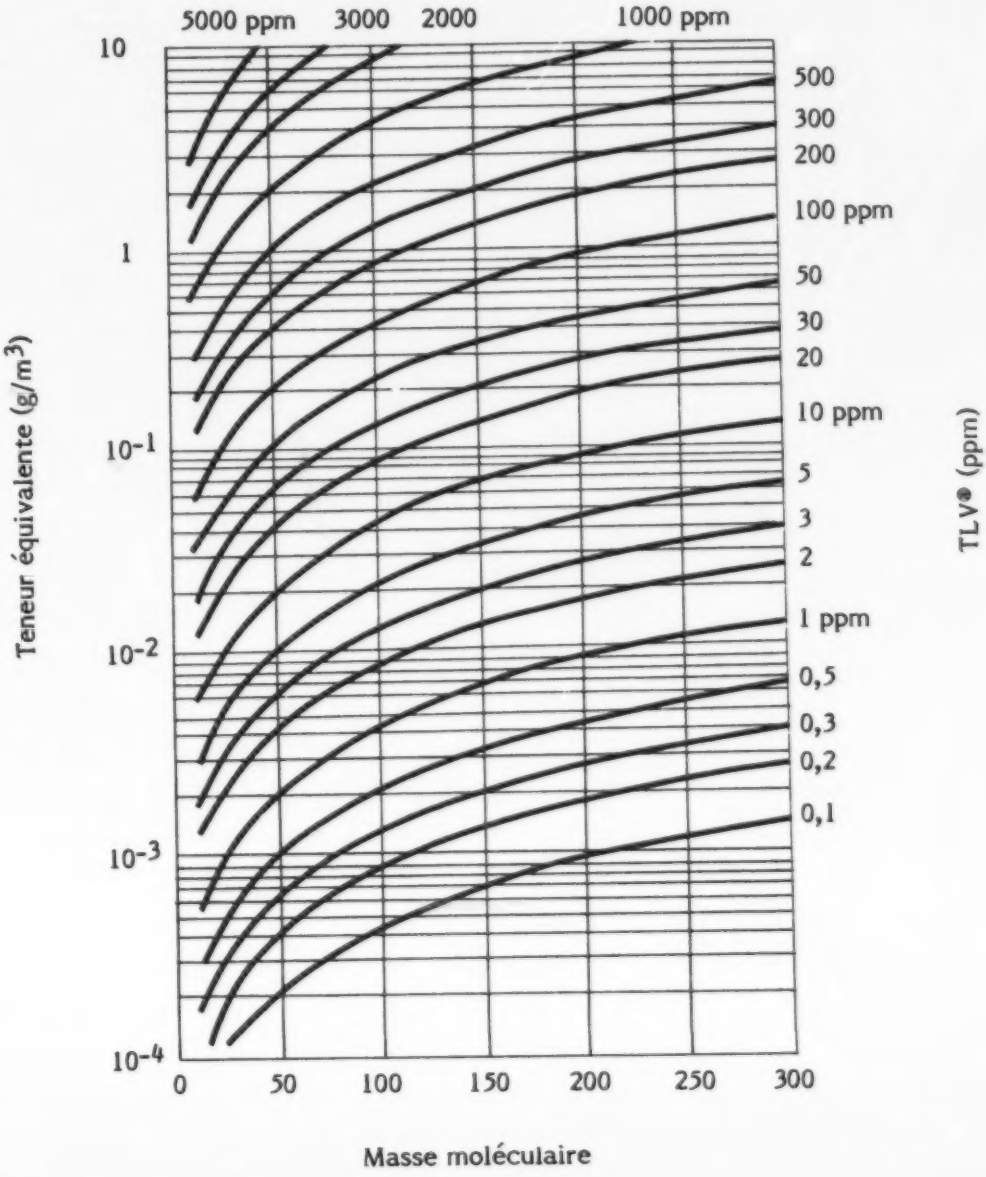
Note. - Les chiffres ci-dessus ne valent que pour une teneur de 4,35 g/m^3.
Exemple. - Pour un débit d'émission de vapeurs q = 5,2 x 10^4 g/s, une vitesse de vent u = 2,1 m/s et des conditions météorologiques de catégorie F, q/u = 24 760 g/m, ce qui donne une demi-largeur maximale du panache L/2 max. de 60 m.

5.3.4.5 Nomogrammes de conversion des unités. - La figure 14 permet de convertir de ppm en g/m^3 les unités de mesure de la *Threshold Limit Value* (TLV•). La figure 15 permet de convertir de pourcentage volumique en g/m^3 les unités de mesure de la limite inférieure d'inflammabilité.

Figure 14

ÉTHYLBENZÈNE

CONVERSION DES UNITÉS DE LA TLV® (ppm en g/m^3)

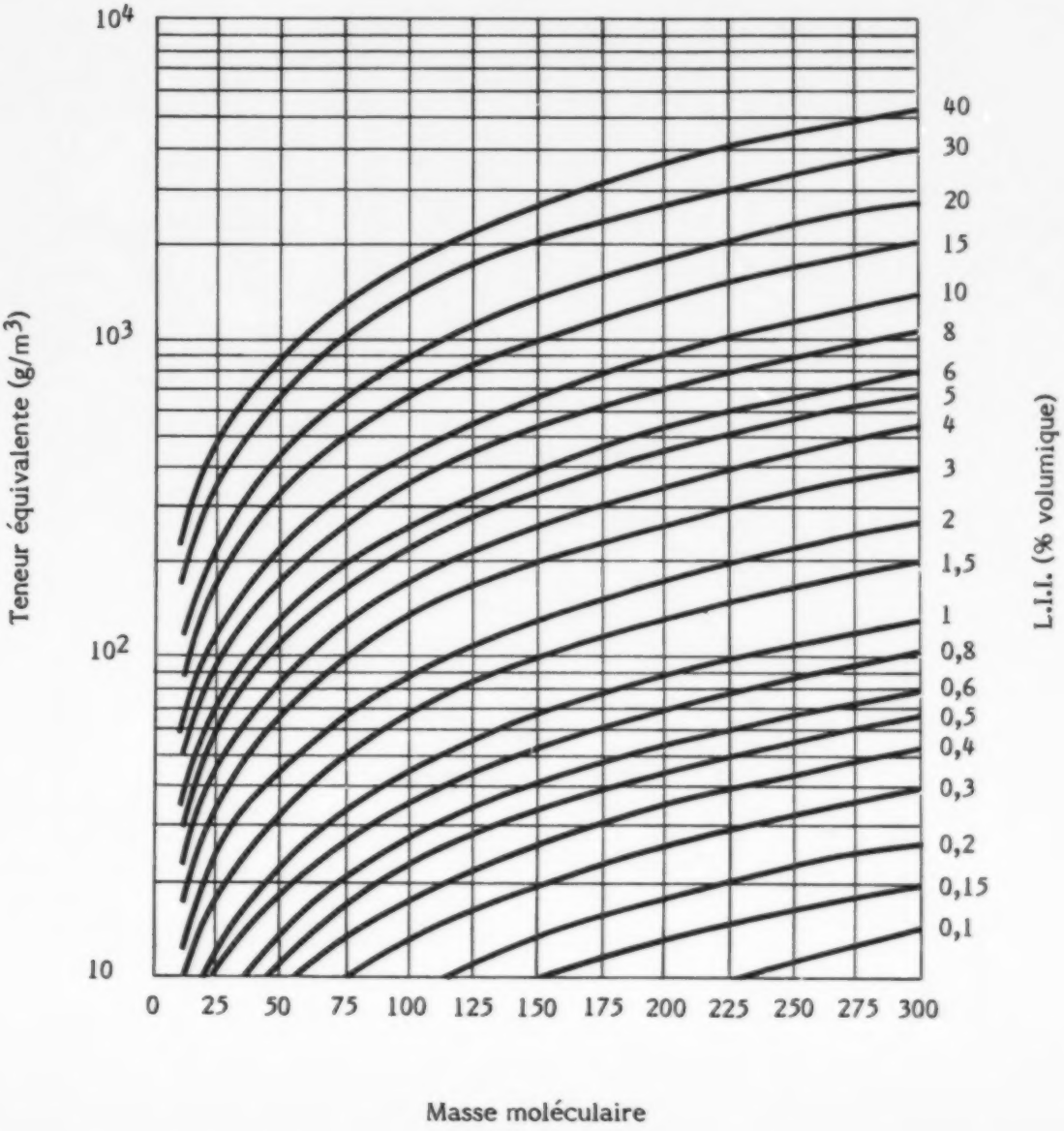


Exemple. - Masse moléculaire de l'éthylbenzène = 106; TLV® = 100 ppm;
alors TLV® en g/m^3 = 0,45.
Note. - Ces données valent pour une température de 25 °C et une pression de Hg de 760 mm.

Figure 15

ÉTHYLBENZÈNE

CONVERSION DES UNITÉS DE LA LIMITE INFÉRIEURE D'INFLAMMABILITÉ (% volumique en g/m^3)



Exemple. - Masse moléculaire de l'éthylbenzène = 106; L.I.I. = 1 p. 100;
alors TLV® en g/m^3 = 45.
Note. - Ces données valent pour une température de 25 °C et une pression de Hg de 760 mm.

5.3.5 Résumé de la modélisation des émissions

5.3.5.1 Marche à suivre dans le cas d'une émission modélisable en tant que panache. - Les produits chimiques dont l'émission de vapeurs peut être modélisée sous forme de panache sont ceux dont le déversement instantané donne, à la surface du sol ou de l'eau, une nappe dont l'évaporation demande un certain temps. Le taux d'évaporation du produit et les dimensions de la nappe servent à déterminer le débit d'émission de vapeurs en vue d'évaluer la diffusion atmosphérique. Les produits chimiques solides et liquides dont la pression de vapeur à l'équilibre est inférieure à 10 x TLV• ne font pas l'objet d'un modèle.

En général, un ensemble uniforme d'hypothèses a servi à déterminer dans les exemples la zone dangereuse d'exposition aux vapeurs. Ces hypothèses sont les suivantes:

a) Déversement instantané de 20 tonnes de liquide à partir d'un wagon-citerne standard de 80 000 litres;
b) Le liquide déversé forme une nappe dont le rayon est déterminé par le rayon maximal d'une nappe du produit chimique en cause, calculé à partir de données tirées du CHRIS (1974);
c) Une teneur dangereuse limite égale à la plus petite des valeurs ci-après: soit la TLV• x 10, soit la limite inférieure d'inflammabilité.

Dans le cas de certains produits dont les émissions ont été modélisées en tant que panaches, ces hypothèses ne convenaient pas, pour des raisons que l'on trouvera expliquées dans les Enviroguides traitant de ces produits. Ces derniers sont énumérés ci-dessous, après indication du type d'exception:

a) Danger inhabituel: phosphore rouge (inflammation spontanée d'un solide);
b) Quantité déversée différente: phosphore rouge (47 000 litres);
c) Rayon maximal de la nappe supposé égal à celui d'une substance chimique traitée dans le CHRIS: toluène, styrène et xylènes (éthylbenzène); chlorure d'éthylène (benzène); oxyde de propylène (nitrate d'éthyle);
d) Rayon maximal de la nappe fixé de façon arbitraire: mercure, plomb-tétraéthyle et acide sulfurique (oléum) (épaisseur de la nappe fixée à 2 mm); acide acétique, anhydride acétique, formaldéhyde, méthanol, morpholine, acide nitrique et butyraldéhyde (valeur intermédiaire entre celles qui sont attribuées au benzène et au nitrate d'isoamyle);
e) Teneur dangereuse limite, différente de la valeur la plus faible de la TLV• x 10 ou de la L.I.I. ou teneur attribuée: fluorure d'hydrogène (IDLH); phosphore rouge (acide phosphorique); butyraldéhyde (teneur toxique minimale).

5.3.5.2 Marche à suivre dans le cas d'une émission modélisable en tant que bouffée. - Les produits dont l'émission est modélisable de cette façon sont en général ceux qui émettent instantanément un nuage de vapeurs lorsqu'ils sont déversés sur le sol ou l'eau. La

masse de vapeurs émises dans l'atmosphère est ensuite utilisée dans les calculs permettant d'évaluer la diffusion atmosphérique. Voici les hypothèses posées dans les exemples pour déterminer la zone d'exposition dangereuse:

a) Déversement instantané de 20 tonnes de liquide à partir d'un wagon-citerne standard de 80 000 litres;
b) La vaporisation instantanée de la totalité du liquide provoque la formation d'une bouffée;
c) La teneur dangereuse limite est égale à la plus faible des valeurs ci-après: la TLV• x 10 ou la limite inférieure d'inflammabilité.

Dans le cas de certains produits chimiques à émission modélisée en tant que bouffée, ces hypothèses ne convenaient pas. Ces derniers sont énumérés ci-dessous, après indication du type d'exception:

a) Récipients ou moyens de transport différents: éthylène, gaz naturel (installations de stockage de diverses tailles); néanmoins, les exemples sont donnés pour un déversement de 80 000 litres;
b) Vaporisation non totale: chlorure de vinyle et oxyde d'éthylène (25 p. 100).

5.4 Comportement dans l'eau

5.4.1 Aperçu et objectifs. - En général, la diffusion de polluants dans les eaux présente un risque moindre pour la vie et la propriété que la diffusion dans l'atmosphère de vapeurs toxiques ou inflammables. En revanche, l'action toxique vis-à-vis de la faune aquatique et la bio-amplification peuvent avoir sur le milieu aquatique des effets à long terme bien plus graves. Beaucoup de produits chimiques sont toxiques pour le biote aquatique à des teneurs très faibles; même dans une vaste étendue d'eau, la dilution à une teneur inférieure à celle du seuil de toxicité peut être longue. Alors, non seulement le milieu devient-il toxique mais encore la zone touchée est-elle grande. De plus, même lorsque les teneurs sont inférieures à celles qui produisent des effets toxiques aigus, la bioconcentration peut augmenter la mortalité chez les espèces des maillons supérieures de la chaîne alimentaire, menaçant ainsi leur survie.

La diffusion des corps dans l'eau varie en fonction de plusieurs de leurs propriétés. Les modèles élaborés décrivent: l'étalement à la surface de l'eau d'un liquide moins lourd que l'eau et insoluble; l'enfoncement et la diffusion d'un liquide plus lourd que l'eau et insoluble; le mélange et la dilution d'un corps soluble; et l'évaporation d'un corps volatil à la surface de l'eau. Les hypothèses posées correspondent aux pires cas afin d'obtenir une valeur qui ne sous-estime pas l'ampleur de la diffusion dans des conditions prévisibles.

5.4.2 Sources d'information. - Les nomogrammes ont été établis à partir de modèles présentés par Raj (1974). Plusieurs autres travaux cités dans la collection ont servi à élaborer

des modèles dans des conditions particulières de diffusion, notamment:

- *Dynamics of Oil Slicks* (Fannelop et Waldman, 1972);
- *A Critical Technical Review of Six Hazard Assessment Models* (Eisenberg, 1975);
- *CHRIS Hazard Assessment Handbook* (CHRIS, 1974);
- *Chemodynamics, Environmental Movement of Chemicals in Air, Water and Soil* (Thibodeaux, 1979);
- *Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook* (Raj, 1974);
- *Development of Additional Hazard Assessment Models* (Raj, 1977).

5.4.3 Élaboration des modèles et préparation des nomogrammes

5.4.3.1 Étalement d'un liquide sur l'eau. - Dans les Enviroguides, le comportement d'un corps insoluble et moins lourd que l'eau, déversé sur l'eau, est décrit par les quatre nomogrammes suivants:

- Rayon de la nappe en fonction du temps écoulé (eau calme, nappe non confinée) pour diverses masses de liquide déversé, avec indication du rayon maximal de la nappe;
- Longueur de canal touchée en fonction du rayon équivalent de la nappe (eau calme, nappe confinée) pour différentes largeurs du canal;
- Distance de déplacement en fonction du temps écoulé pour différentes vitesses du courant de surface;
- Addition vectorielle du courant de surface et du vent.

La relation entre le rayon de la nappe et le temps écoulé est basée sur les hypothèses suivantes:

- Le corps est non miscible;
- Les eaux sont calmes (ni vagues, ni marée);
- La masse totale demeure constante;
- Les propriétés physiques du corps demeurent inchangées au cours du déversement;
- Le déversement est instantané;
- La température de l'eau est de 20 °C.

La vitesse d'étalement sur l'eau dépend de l'équilibre entre les forces et les propriétés qui poussent le fluide à s'étaler (pesanteur et tension superficielle) et celles qui s'opposent à l'étalement (inertie et viscosité). L'étalement de la nappe est simplifié et synthétisé en trois phases d'interaction: pesanteur-inertie, pesanteur-viscosité et viscosité-tension superficielle.

Selon les divers paramètres de déversement, chacune des relations prévoit très bien le rayon de la nappe sur un certain intervalle de temps écoulés. De fait, le régime pesanteur-inertie est utilisé pour des temps courts; le régime pesanteur-viscosité, pour des temps moyens; et le régime viscosité-tension superficielle, pour des temps longs. La démarche permettant de choisir la méthode de calcul du rayon d'après le temps écoulé est donnée aux tableaux 5 et 6.

Étalement d'un fluide à coefficient de viscosité élevé sur un fluide à coefficient de viscosité faible

Tableau 5

Pesanteur - Inertie	Pesanteur - Viscosité	Viscosité - Tension superficielle
pour $t < 0{,}546\left[\frac{V}{G\nu_w}\right]^{1/3}$	pour $0{,}546\left[\frac{V}{G\nu_w}\right]^{1/3} < t < 0{,}375\,\frac{\rho_w}{\sigma}\left[G^2 V^4 \nu_w^2\right]^{1/6}$	pour $t > 0{,}375\,\frac{\rho_w}{\sigma}\left[G^2 V^4 \frac{2}{\mu_w}\right]^{1/6}$
$r = 1{,}14\,(G\,V)^{1/4}\,t^{1/2}$	$r = 0{,}98\left[\frac{G^2 V^4}{\nu_w}\right]^{1/12} t^{1/4}$	$r = 1{,}6\left[\frac{\sigma}{\sqrt{\mu_w \rho_w}}\right]^{1/2} t^{3/4}$

ν_w = viscosité cinématique de l'eau (m^2/s)
ρ_w = masse volumique de l'eau (kg/m^3)
μ_w = viscosité absolue de l'eau ($N \cdot s/m^2$)
r = rayon de la nappe (m)
t = temps écoulé depuis le déversement (s)
V = volume déversé (m^3)
G = $g\,(1 - \rho_1/\rho_w)$ (m/s^2)
g = accélération de la pesanteur (m/s^2)
ρ_1 = masse volumique du fluide (kg/m^3)
σ = tension superficielle à l'interface (N/m)

Tableau 6

Étalement d'un fluide à coefficient de viscosité faible sur un fluide à coefficient de viscosité élevé

Pesanteur - Inertie	Pesanteur - Viscosité	Viscosité - Tension superficielle
pour $t_1 = 0{,}4446\left[\frac{V}{G\nu_l}\right]^{1/3}$		pour $t_2 = 0{,}1697\left[\frac{G\,V\,\mu_l^2}{\sigma^2\nu_l}\right]$
et $t < t_1$	pour $t_1 \leqslant t \leqslant t_2$	et $t > t_2$
$r = 1{,}14\left[G\,V\right]^{1/4} t^{1/2}$	$r = 0{,}8412\left[\frac{G\,V^3}{\nu_l}\right]^{1/8} t^{1/8}$	$r = 1{,}05\left[\frac{\sigma\,V}{\mu_l}\right]^{1/4} t^{1/4}$

ν_l = viscosité cinématique du fluide (m^2/s)
μ_l = viscosité absolue du fluide ($N \cdot s/m^2$)
σ = tension superficielle à l'interface (N/m)

Ces équations sont basées sur des travaux de Fannelop et Waldman (1972). Celles du tableau 5 servent à prévoir le rayon de la nappe en fonction du temps pour un fluide de viscosité élevée s'étalant sur un fluide de basse viscosité, tandis que celles du tableau 6 permettent de prévoir le rayon de la nappe d'un fluide de basse viscosité s'étalant sur un fluide de viscosité élevée. Cependant, selon un critique des modèles d'étalement (Eisenberg, 1975), les équations utilisées pour une nappe de fluide de viscosité élevée s'étalant sur un fluide de basse viscosité sont aussi valables lorsque la viscosité de la substance est égale ou supérieure à 0,2 fois celle de l'eau. Dans chaque Enviroguide, le rayon maximal de la nappe indiqué sur le nomogramme du rayon de la nappe en fonction du temps a été calculé d'après les données de l'*Hazard Assessment Handbook* (CHRIS, 1974) et est basé sur la densité relative du fluide.

Exemple. - Soit un déversement de 20 tonnes d'éthylbenzène dans un grand lac. Déterminer la taille de la nappe après 20 minutes.

$\mu_l = 0{,}00065\ N \cdot s/m^2$

$\mu_w = 0{,}001\ N \cdot s/m^2$

$\mu_l > 0{,}2\ \mu_w$.

Les équations décrivant l'étalement d'un fluide de viscosité élevée sur un fluide de basse viscosité sont donc utilisées pour déterminer le rayon de la nappe.

$\nu_w = 1 \times 10^{-6}\ m^2/s$

$\rho_w = 1000\ kg/m^3$

$\rho_l = 880\ kg/m^3$

$\sigma = 0{,}035\ N/m$

$V = 22{,}7\ m^3$

$G = 1{,}2\ m/s^2$.

Pour une période de 20 minutes, déterminer le régime décrivant l'équation de l'étalement.

- Pesanteur-inertie

$$t < 0{,}546 \left[\frac{V}{G\nu_w}\right]^{1/3}$$

1200 s > 145 s, le régime pesanteur-inertie ne s'applique pas.

- Viscosité-tension superficielle

$$t > 0{,}375 \frac{\rho_w}{\sigma} \left[G^2 V^4 \nu_w^2\right]^{1/6}$$

Comme 1200 s > 913 s, se servir du régime viscosité-tension superficielle.

L'équation du tableau 5 donne un rayon de 61 m, alors que les graphiques des Enviroguides donnent une valeur de 60 m.

Pour déterminer la longueur du canal touchée, on s'est servi d'une relation simplifiée faisant intervenir le rayon trouvé à l'aide du premier nomogramme:

$$x = \frac{\pi r^2}{L}$$

où: x = longueur touchée (m)
r = rayon équivalent de la nappe (m)
L = largeur du cours d'eau (m).

La distance sur laquelle la nappe s'est déplacée est donnée par:

$$x = 60\ tu$$

où: x = distance de déplacement (m)
t = temps écoulé (mn)
u = vitesse du courant de surface (m/s).

Le dernier nomogramme a été préparé pour déterminer la direction et la vitesse de déplacement d'une nappe sur une étendue d'eau libre. En règle générale, on suppose que la vitesse de déplacement de la nappe est donnée par addition vectorielle de la vitesse du courant et de 3 p. 100 de la vitesse mesurée du vent (CHRIS, 1974).

5.4.3.2 Produit chimique sédimentant. - Un modèle mathématique (Thibodeaux, 1979) a été utilisé pour prévoir la longueur et la largeur de la zone touchée du lit d'un cours d'eau non soumis aux marées. Il est postulé que la substance déversée est insoluble, que sa masse volumique est supérieure à celle de l'eau et que son point d'ébullition est supérieur à la température ambiante. C'est le cas du plomb-tétraéthyle, par exemple.

Les Enviroguides comportent quatre nomogrammes permettant de déterminer la longueur et la largeur de la zone polluée.

- Vitesse de chute en fonction du diamètre équivalent de l'orifice pour une plage de vitesses moyennes de l'écoulement (de l'eau);
- Temps de chute en fonction de la vitesse de chute pour une plage de vitesses de l'écoulement (de l'eau);
- Distance en aval en fonction du temps de chute pour une plage de vitesses moyennes de l'écoulement (de l'eau);
- Largeur de la zone touchée en fonction du diamètre équivalent de l'orifice pour une plage de hauteurs d'eau.

L'équation suivante a été utilisée pour calculer la vitesse de chute des gouttelettes les plus petites sortant d'un orifice donné:

$$d_{min.} = \frac{\sigma K_F \left[\frac{1000\, D\rho_w}{0{,}1\ \mu_w}\right]^{3/5}}{10\rho_l\ u_{rel.}^{7/5}}$$

où:

$d_{min.}$ = diamètre minimal des gouttelettes (cm)

K_F = constante expérimentale (0,05468)

D = diamètre de l'orifice (m)

ρ_w = masse volumique de l'eau (g/cm^3)

σ = tension superficielle à l'interface eau-liquide (N/m)

μ_w = viscosité de l'eau ($g/cm \cdot s$)

ρ_l = masse volumique du produit chimique (g/cm^3)

$u_{rel.}$ = vitesse relative du produit chimique (m/s)
$= (u^2 + u_n^2)1/2$

u = vitesse moyenne de l'écoulement (de l'eau) (m/s)

u_n = vitesse de sortie du produit chimique à l'orifice (m/s) $= 0{,}60\ (2\ gh)^{1/2}$

h = hauteur de liquide dans le wagon-citerne (m).

Une analyse de la sensibilité des paramètres du modèle a indiqué que la longueur de la zone polluée était proportionnelle à la hauteur de liquide dans le wagon-citerne et inversement proportionnelle à la température de l'eau. Tous les calculs supposent une température de l'eau de 5 °C et une hauteur du produit de 2,75 m (laquelle correspond au diamètre des wagons-citernes utilisés pour préparer les nomogrammes de la fuite). L'utilisation de ces deux valeurs donne une évaluation prudente pour la plupart des déversements.

L'équation permettant de déterminer le diamètre minimal des gouttelettes suppose un corps à l'état liquide. Pour un corps solide, les calculs ci-dessus ne sont pas nécessaires: le diamètre minimal des particules est évalué d'après les caractères physiques du corps pendant son transport.

Les gouttelettes se forment pendant que le produit se déverse et pendant qu'il pénètre dans l'eau. Dans l'eau, la vitesse de chute des gouttelettes varie selon leur régime d'écoulement. Un nombre sans dimension, qui représente le rapport des forces de pesanteur et de viscosité, sert à déterminer ce régime:

$$K = d_{min.} \left[\frac{g \rho_w \rho \text{ DIFF.}}{\mu_w^2} \right]^{1/3}$$

où: K = nombre sans dimension

$\rho_{DIFF.}$ = différence de masse volumique entre le produit et l'eau (g/cm^3)

μ_w = viscosité de l'eau ($g/(cm \cdot s)$)

g = accélération de la pesanteur (cm/s^2).

Lorsque la valeur de K est inférieure à 3,3, l'équation suivante sert à calculer la vitesse limite de chute:

$$u_l = \frac{g \, d_{min.}^2 \, \rho \text{ DIFF.}}{18 \, \mu_w}$$

où: u_l = vitesse limite de chute (cm/s).

Si la valeur de K est supérieur à 43,6,

$$u_l = 1{,}75 \left[\frac{g \, d_{min.} \, \rho_{DIFF.}}{\rho_w} \right]^{1/2}.$$

Si la valeur de K est comprise entre 3,3 et 43,6,

$$u_l = \frac{0{,}153 \, g^{0,71} \, d_{min.}^{1,14} \, \rho_{DIFF.}^{0,71}}{\rho_w^{0,29} \quad \mu_w^{0,43}}.$$

La relation entre la vitesse limite de chute, la hauteur d'eau et le temps de chute est la suivante:

$$t = \frac{5}{3} \frac{h}{u_l}$$

où: t = temps de chute (mn)

h = hauteur d'eau (m).

La distance en aval (longueur de la zone polluée) est fonction du temps de chute et de la vitesse moyenne de l'écoulement (de l'eau).

$$x = 60 \, ut$$

où: x = distance en aval (m)

u = vitesse moyenne de l'écoulement (de l'eau) (m/s)

t = temps de chute (mn).

La largeur L de la zone polluée est fonction du diamètre de l'orifice et de la hauteur d'eau. Les équations suivantes ont servi à établir le nomogramme donnant la largeur.

$$F_r = \frac{u_n^2}{g\,D}$$

où F_r = nombre de Froude
u_n = vitesse de sortie du produit à l'orifice (m/s)
D = diamètre équivalent de l'orifice (m)
g = accélération de la pesanteur (m/s^2).

$$W_e = \frac{1000\ D\ u_n^2\ \rho_l}{\sigma}$$

où: W_e = nombre de Weber
ρ_l = masse volumique du produit (g/cm^3)
σ = tension superficielle à l'interface eau-liquide (N/m).

$$R_e = \frac{1000\ D\ u_n \rho_l}{\mu_l}$$

R_e = nombre de Reynolds
μ_l = viscosité du produit (kg/(m . s))
ρ_l = masse volumique du produit (g/cm^3).

$$H_e = \frac{h}{D}$$

où: H_e = nombre de Height
h = hauteur d'eau (m)
D = diamètre équivalent de l'orifice (m).

$$A_R = \frac{605\ F_r^{0,41}\ W_e^{0,61}}{R_e^{0,51}\ H_e^{1,1}}$$

où: A_R = nombre sans dimension définissant la zone (les termes F_r, W_e, R_e et H_e sont définis ci-dessus).

Il s'ensuit que:

$$L = \left[\frac{4\ A_R\ h^2}{\pi}\right]^{1/2}$$

où: L = largeur de la zone polluée (m)
h = hauteur d'eau (m).

Exemple. - Soit un déversement de 20 tonnes de chlorure d'éthylène dans un cours d'eau dont la largeur est de 250 m, la profondeur, de 10 m (hauteur d'eau), et la vitesse d'écoulement, de 0,5 m/s. En supposant que le diamètre équivalent de l'orifice soit de 200 mm, à quelle distance en aval la particule la plus fine est-t-elle transportée avant d'atteindre le lit du cours d'eau? Quelle est la largeur maximale de la zone polluée?

ρ_w = 1 g/cm^3
μ_w = 0,0153 g/(cm . s)
σ = 0,030 N/m
ρ_l = 1,3 g/cm^3
μ_l = 0,001 kg/(m . s)
D = 0,200 m
h = 2,75 m
u = 0,5 m/s.

Résumé des calculs:

u_n = 4,4 m/s
$u_{rel.}$ = 4,4 m/s
$d_{min.}$ = 0,019 cm
K = 2,05.

La vitesse limite de chute se calcule donc de façon suivante:

$$u_l = \frac{980\, d_{min.}^{\,2}\, \rho_{DIFF.}}{18\, \mu_w}$$

= 0,38 cm/s
t = 44 mn.

La particule la plus fine est transportée 1320 m en aval avant d'atteindre le lit. (Le graphique de l'Enviroguide *Le chlorure d'éthylène* indique 1500 m.)

F_r = 9,9
W_e = 167 787
R_e = 1 144 000
H_e = 50
A_R = 26
L = 58 m

La largeur de la zone polluée est de 58 m. (Le graphique de l'Enviroguide *Le Chlorure d'éthylène* donne la même valeur.)

5.4.3.3 Mélange et dilution. - Des nomogrammes ont été préparés pour évaluer la teneur des cours d'eau non soumis aux marées et pour définir la zone dangereuse et la teneur moyenne des plans d'eau (calme). Les nomogrammes applicables aux cours d'eau non soumis aux marées sont les suivants:

- Distance en fonction du temps pour une plage de vitesses moyennes d'écoulement (de l'eau);
- Rayon hydraulique en fonction de la largeur du canal pour une plage de profondeurs du canal (hauteurs d'eau);
- Coefficient de diffusion turbulente en fonction du rayon hydraulique pour une plage de vitesses moyennes de l'écoulement;
- Alpha* en fonction du coefficient de diffusion turbulente pour divers intervalles de temps écoulé;
- Delta* en fonction d'alpha pour une plage de masses de produit déversé;
- Teneur maximale en fonction de delta pour une plage de sections mouillées de différentes surfaces.

Pour des plans d'eau, on utilise les nomogrammes suivants:

- Volume d'eau en fonction du rayon hydraulique de la zone dangereuse pour une plage de profondeurs du lac (hauteurs d'eau);
- Teneur moyenne de l'eau de la zone dangereuse en fonction du volume pour une plage de masses de produit déversé.

Les teneurs indiquées pour les cours d'eau non soumis aux marées sont basées sur les équations présentées dans l'*Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook* (Raj, 1974). Le modèle s'applique aux liquides de même densité que l'eau, qui sont miscibles à l'eau. Les teneurs sont beaucoup plus difficiles à déterminer pour des corps plus lourds ou plus légers que l'eau. Afin d'examiner en détail les effets de la densité, il est nécessaire de résoudre le système d'équations différentielles partielles, comprenant des équations de continuité, de quantité de mouvement et de diffusion. Le modèle établit un canal rectangulaire théorique et suppose une teneur uniforme en polluant pour toute section donnée de l'écoulement. En pratique, une telle uniformité n'est possible qu'en des points situés assez loin en aval du lieu du déversement, là où les mécanismes de mélange et de dilution ont joué suffisamment pour

---

* Alpha et delta sont des termes intermédiaires sans signification physique; ils servent à faciliter le calcul de la teneur en aval.

produire une répartition égale du polluant. Il s'agit donc d'une approximation "à grande distance". Le modèle postule un déversement instantané et s'applique aux cours d'eau dont le rapport largeur/profondeur est inférieur à 100.

La relation utilisée pour tracer le nomogramme donnant le temps écoulé en fonction de la distance parcourue pour une plage de vitesses d'écoulement (de l'eau) est:

$$t = \frac{x}{60\ u}$$

où: t = temps (mn)
x = distance (m)
u = vitesse moyenne d'écoulement (m/s).

Le rayon hydraulique d'un canal rectangulaire est défini par l'équation suivante:

$$r = (L \times h)/(L + 2\ h)$$

où: r = rayon hydraulique (m)
L = largeur du cours d'eau (m)
h = hauteur d'eau (m).

Voici le coefficient de diffusion turbulente utilisé pour déterminer la teneur en polluant:

$$E = 225\ u^* r$$

où: E = coefficient de diffusion turbulente (m^2/s)
r = rayon hydraulique (m)
u^* = vitesse de frottement (m/s).

La vitesse de frottement est définie comme suit:

$$u^* = 3{,}115\ n\ \frac{u}{r^{1/6}}$$

où: n = coefficient de rugosité ($m^{1/6}$)
u = vitesse moyenne d'écoulement (m/s)
r = rayon hydraulique (m).

Le "coefficient de rugosité" décrit la force de résistance d'un cours d'eau à l'écoulement. Sa valeur peut varier de 0,020 à 0,050. Chaque cours d'eau a un coefficient qui lui est propre. Pour la présente étude, on a choisi une valeur moyenne de 0,030.

La teneur maximale en polluant à grande distance se calcule de la façon suivante:

$$T = \frac{m}{s\sqrt{4\pi Et}}$$

où: T = teneur (kg/m^3)
s = surface de la section transversale (m^2)
E = coefficient de diffusion (m^2/s)
m = masse déversée (kg)
t = temps (s).

Pour résoudre l'équation de la teneur en polluant en fonction de s, de E, de t et de la masse, trois nomogrammes sont nécessaires. Le premier nomogramme résout l'équation:

$$\alpha = 240\,\pi Et$$

où: α = alpha, terme intermédiaire (m)
E = coefficient de diffusion turbulente (m^2/s)
t = temps (mn).

Le second nomogramme résout l'équation:

$$\Delta = \frac{m}{\alpha} \times 1000$$

où: Δ = delta, terme intermédiaire (kg/m)
m = masse déversée (tonnes)
α = alpha

Le troisième nomogramme résout l'équation donnant la teneur:

$$T = \frac{\Delta/s}{\Delta/s + \rho_w} \times 10^6$$

où: T = teneur (ppm)
Δ = delta
s = surface de la section transversale (m^2)
ρ_w = masse volumique de l'eau (kg/m^3).

Exemple. - Soit un déversement de 20 tonnes d'acide acétique en solution titrant 50 p. 100, survenu dans un cours d'eau dont la largeur est de 50 m, et la profondeur de 5 m

(hauteur d'eau); la vitesse moyenne de l'écoulement (de l'eau) est évaluée à 1 m/s. Quelle est la teneur maximale à prévoir dans une prise d'eau située à 5 km en aval:

m = 10 tonnes
t = 83,3 mn
r = 4,2 m
u^* = 0,074
E = 69,9 m^2/s
α = 2095
Δ = 4,8
T = 19,2 ppm.

La teneur trouvée, soit 19,2 ppm, confirme la valeur de 20 ppm obtenue à l'aide du graphique de l'Enviroguide *L'acide acétique*.

Aucune modélisation de la diffusion moléculaire en eaux calmes n'a été faite. Les auteurs ont cependant préparé des nomogrammes permettant de définir la zone dangereuse et la teneur moyenne en polluant en fonction de la masse déversée, sans tenir compte du temps écoulé.

Le nomogramme définissant le volume d'eau en fonction du rayon et de la hauteur d'eau se fonde sur un cylindre théorique dont le rayon représente la distance entre le point de déversement et le point de mesure de la teneur.

$$V = \pi r^2 h$$

où: V = volume (m^3)
r = rayon (m)
h = hauteur d'eau (m).

La teneur moyenne est définie ainsi:

$$T = \frac{m}{1000\ m + (\rho_w \times V)} \times 10^9$$

où: T = teneur moyenne (ppm)
m = masse déversée (tonnes)
ρ_w = masse volumique de l'eau (kg/m^3)
V = volume du cylindre (m^3).

5.4.3.4 Produit chimique volatil. - Les nomogrammes relatifs au déversement d'un produit volatil sont basés sur des valeurs tirées du *Hazard Assessment Handbook* (CHRIS, 1974). Les valeurs correspondant aux 10 produits chimiques choisis sont présentées au tableau 7; ces données proviennent des sections D, K et V. Les nomogrammes ont été préparés après avoir converti les unités du système impérial en unités du système international.

Trois modèles, décrits dans l'*Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook* (Raj, 1974), ont servi à évaluer le rayon de la nappe en fonction du temps écoulé depuis le déversement. Le modèle pour chaque produit est choisi selon certains caractères physiques du produit:

- Le produit est insoluble ou légèrement soluble dans l'eau, sur laquelle il flotte; il a un point d'ébullition supérieur à la température ambiante; exemples: benzène, cyclohexane et naphta (essence minérale);
- Le produit est insoluble ou légèrement soluble dans l'eau, sur laquelle il flotte; son point d'ébullition est inférieur à la température ambiante; exemples: éthylène, sulfure d'hydrogène, propylène et chlorure de vinyle;
- Le produit est soluble dans l'eau; son point d'ébullition est inférieur à la température ambiante; exemples: ammoniac, fluorure d'hydrogène et oxyde d'éthylène.

L'évolution massique de la nappe en fonction du temps n'est pas calculée, vu la courte période nécessaire à l'évaporation complète. La modélisation du déversement se fait en supposant que la température maximale de l'eau est de 20 °C; il s'agit d'une température maximale raisonnable pour les eaux de surface. À noter que plus la température de l'eau est élevée, plus le rayon maximal de la nappe est court et plus le temps nécessaire à l'évaporation complète est bref. L'objet principal des nomogrammes est de donner le rayon maximal de la nappe et le temps d'évaporation qui servent à modéliser la diffusion dans l'atmosphère. Les nomogrammes donnent une évaluation prudente du temps nécessaire à l'évaporation complète, mais il n'en va pas de même pour ce qui est du rayon maximal de la nappe. Quelques modélisations seulement ont été faites pour vérifier les valeurs données dans l'*Hazard Assessment Handbook* (CHRIS, 1974).

5.5 Comportement dans le sol de surface et dans le sous-sol

5.5.1 Aperçu et objectifs. - La pénétration dans le sol de la substance déversée et sa migration vers les eaux souterraines constituent une menace sérieuse. Pour évaluer l'ampleur des risques, chaque Environnide donne une représentation graphique de la hauteur de migration

Tableau 7

Rayon maximal de la nappe (mètres) et temps nécessaire* à l'évaporation complète (minutes)

	Masse déversée (tonnes)														
	Jus-qu'à 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 1	1 à 5	5 à 10	10 à 30	30 à 60	60 à 125	125 à 250	250 à 500	500 à 1000	1000 à 2000	2000 à 4000	4000 à 8000	>8000
ydre	6 (1,2)	9 (1,6)	12 (1,9)	20 (2,6)	26 (3,2)	36 (4,1)	45 (4,9)	60 (5,8)	75 (6,8)	93 (8,0)	117 (9,4)	150 (11)	186 (13)	237 (15)	279 (17)
ogène	6 (31)	8 (40)	11 (49)	17 (67)	23 (82)	30 (100)	42 (120)	51 (140)	66 (170)	84 (200)	105 (230)	132 (270)	165 (310)	207 (360)	246 (410)
	14 (3)	20 (4)	26 (7)	42 (13)	54 (17)	72 (25)	90 (34)	180 (44)	138 (54)	180 (65)	240 (79)	315 (94)	420 (117)	555 (145)	675 (165)
	5 (0,3)	6 (0,4)	9 (0,5)	15 (0,7)	21 (1,0)	30 (1,2)	42 (1,4)	54 (1,7)	72 (2,1)	96 (2,4)	123 (2,9)	162 (3,4)	210 (4,1)	273 (4,9)	330 (5,5)
ogène	3 (0,8)	5 (1,0)	8 (1,3)	12 (1,8)	18 (2,2)	26 (2,8)	36 (3,4)	45 (4,0)	60 (4,8)	78 (5,6)	102 (6,7)	135 (7,8)	177 (9,3)	231 (11)	279 (13)
	5 (0,5)	6 (0,6)	9 (0,7)	17 (1,0)	23 (1,3)	33 (1,6)	48 (2,0)	60 (2,3)	78 (2,8)	102 (3,3)	135 (3,9)	177 (4,6)	228 (5,5)	300 (6,5)	360 (7,4)
nyle	3 (1,3)	5 (1,8)	6 (2,2)	12 (3,0)	17 (3,7)	24 (4,7)	33 (5,7)	45 (6,7)	57 (8,0)	75 (9,4)	99 (11)	132 (13)	171 (16)	222 (19)	273 (21)
ène	6 (3,1)	8 (3,9)	11 (4,8)	18 (6,6)	24 (8,1)	33 (10)	42 (12)	54 (14)	69 (17)	87 (20)	108 (23)	138 (27)	174 (31)	219 (37)	258 (41)
	14 (2)	21 (4)	29 (6)	45 (11)	57 (15)	75 (21)	96 (29)	114 (37)	150 (46)	198 (54)	264 (67)	345 (81)	465 (99)	615 (122)	750 (141)
ice	9 (2)	12 (3)	18 (4)	27 (7)	33 (8)	48 (10)	69 (12)	90 (15)	120 (18)	159 (22)	210 (27)	273 (30)	360 (37)	480 (47)	600 (54)

es extraites du *Hazard Assessment Handbook* (CHRIS, 1974)

la hauteur de migration d'un fluide dans le sous-sol ont donc été établis à partir d'hypothèses simplifiées qui ne font intervenir que des données rudimentaires concernant le lieu du déversement et ne mènent en général qu'à des évaluations des pires cas. Si des évaluations plus précises sont nécessaires, il faut faire une étude plus détaillée du lieu et trouver des solutions plus complexes aux équations décrivant la migration du fluide.

La force de pesanteur et d'autres forces physico-chimiques influent sur la pénétration du fluide sans le sol. L'action de la pesanteur fait descendre le fluide par le réseau de pores et de fissures du sol; mais les forces capillaires dues à l'interaction entre le fluide et le sol peuvent aussi influer sur le déplacement du fluide (par exemple, en cas de déversement d'eau sur un sol sec, le fluide est absorbé par diffusion capillaire).

La hauteur de la migration due aux forces mentionnées varie suivant le degré de résistance qu'offrent les divers types de sol et leur géométrie, suivant la teneur en eau du sol, les propriétés du fluide, la végétation et la température. Dans chaque cas, il est nécessaire, pour prévoir la hauteur de migration du fluide, de résoudre un ensemble complexe d'équations spécifiques aux conditions du déversement.

5.5.2 Sources d'information. - Parmi les équations permettant de décrire la migration d'un fluide dans le sol, mentionnons la loi de Darcy, les équations de continuité et les équations d'état reliant les propriétés d'écoulement à divers états du sol et du fluide. La loi de Darcy peut être exprimée par la formule (Freeze et Cherry, 1979):

$$u = -K\left[\frac{dh}{dl}\right] \qquad (1)$$

où:

u = vitesse d'écoulement ou vitesse de Darcy (m/s)

K = coefficient de Darcy (m/s)

l = direction d'écoulement (m)

h = charge hydraulique (m)

$= Z \times \Psi$

Z = charge altimétrique (m)

Ψ = hauteur piézométrique

Le terme $\frac{dh}{dl}$ est le gradient hydraulique; il faut intervenir la force de pesanteur et les autres forces physico-chimiques qui régissent l'écoulement.

L'équation suivante donne l'influence des propriétés du fluide et du sol:

$$K_0 = \frac{(\rho g)k}{\mu} \qquad (4)$$

où: ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3)

μ = viscosité absolue du fluide (Pa . s)

k = perméabilité intrinsèque du sol (m^2)

g = accélération de la pesanteur (9,81 m/s^2).

Les équations de continuité sont des expressions algébriques qui tiennent compte de la conservation du liquide pendant son transport et qui incluent son emmagasinement dans le sol, son évaporation et son déplacement. Les équations d'état se présentent sous forme d'expressions algébriques et de tableaux.

En général, la solution simultanée de ces équations se fait dans une dimension (verticale), bien qu'il puisse y avoir un mouvement horizontal dû à la diffusion capillaire et aux conditions variables du sol. Les solutions plus complexes sont obtenues avec des méthodes numériques approximatives (par opposition aux méthodes analytiques); elles nécessitent souvent l'informatisation.

5.5.3 Développement et présentation des données. - Pour que ces équations permettent de prévoir avec précision la hauteur de migration à un endroit donné, il faut disposer de données exhaustives sur la stratigraphie, les propriétés et le profil d'humidité du sol à cet endroit. Dans bien des cas, il est peu probable que ces données soient recueillies avant la première intervention destinées à éliminer le risque de pollution du sol et des eaux souterraines. Une façon simplifiée de prévoir la hauteur de migration a été mise au point pour les besoins de la collection "Enviroguide". Conséquence de cette simplification, les prévisions doivent être considérées comme des évaluations approximatives. Toutefois, lorsque cela a été possible, les auteurs ont présenté des prévisions de "pire cas".

La descente du fluide est considérée comme un écoulement en bloc (ou écoulement piston). On suppose la formation d'une colonne saturée en fluide. Les effets physico-chimiques sont négligés de sorte que l'écoulement se produit uniquement par l'action de la pesanteur. Le sol, avant qu'il y ait pénétration du fluide, est supposé être à capacité au champ. La capacité au champ, ou capacité normale d'humidité, est la quantité maximale d'eau retenue dans les pores du sol après que l'eau de gravité s'est égouttée. Lorsqu'il y a écoulement en bloc, la

où: h = hauteur de migration (m)
t = temps de migration (s)
u = vitesse d'écoulement.

Trois types de sol ont été choisis pour représenter une plage de conditions possibles sur le lieu du déversement: sable grossier, sable limoneux et till argileux. Le tableau ci-dessous présente les valeurs établies pour les paramètres qui influent sur la migration des fluides.

Valeurs établies pour les sols

Paramètre	Sable grossier	Sable limoneux	Till argileux
Porosité (m^3/m^3)	0,35	0,45	0,55
Perméabilité intrinsèque (m^2)	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}
Capacité au champ (m^3/m^3)	0,075	0,3	0,45

Des nomogrammes de la migration du fluide ont été préparés pour chaque type de sol, en supposant des conditions uniformes sur toute la hauteur de migration. Pour ce qui est des substances, elles ont été catégoriées comme suit:

- Liquide non miscible sous pression;
- Liquide miscible sous pression;
- Liquide non miscible sédimentant;
- Liquide non miscible flottant;
- Liquide miscible;
- Matière solide soluble;
- Matière solide insoluble.

Ces catégories ont été utilisées dans l'établissement des nomogrammes de la migration.

5.5.3.1 Liquide sous pression. - Les auteurs ont supposé qu'un liquide sous pression déversé s'évaporera rapidement. Cependant, dans le pire cas, une partie du liquide peut pénétrer dans le sol; c'est pourquoi des nomogrammes de la migration ont été préparés. Il est possible de se servir des vitesses d'évaporation présentées dans les Enviroguides pour évaluer la

mesure que le fluide descend de la façon décrite aux équations 4 et 5, une partie du liquide demeure emmagasinée $S_0(m^3/m^3)$ dans les pores du sol. Les valeurs de S_0 choisies sont basées sur la migration des hydrocarbures dans le sol (Blokker, 1971). La descente se poursuit jusqu'à ce que la quantité de liquide déversée par surface unitaire B_0 égale la quantité emmagasinée S_0 dans les pores du sol.

La hauteur de migration est calculée grâce à l'équation 6:

$$h = B_0/nS_0 \qquad (7)$$

Lorsqu'il atteint la surface de saturation, un liquide non miscible flottant s'étale et forme une crêpe dans la frange capillaire, alors qu'un liquide non miscible sédimentant s'enfonce dans la nappe phréatique.

5.5.3.3 Liquide miscible. - Des nomogrammes ont été établis pour un liquide miscible, non dilué ou plus ou moins dilué. Ils supposent qu'un liquide fortement dilué possède une vitesse de migration égale à la vitesse d'infiltration de l'eau.

5.5.3.4 Solide. - Il a été pris pour acquis qu'un solide insoluble ne pénètre pas du tout dans le sol. En revanche, dans le cas d'un solide soluble, la pire hypothèse a été posée, à savoir une chute de pluie ou de neige avant le nettoyage: le solide passe alors en solution susceptible de pénétrer dans le sol. Des nomogrammes de la migration ont été préparés pour des solutions concentrées (de 10 à 30 p. 100 en masse) et diluées (eau). Comme il s'agit du pire cas, l'analyse n'a pas tenu compte d'interactions entre le sol et le polluant (par exemple, l'absorption et la précipitation).

5.5.3.5 Rapport. - Pour chaque produit, les valeurs des paramètres ρ, μ et le cas échéant S_0 sont données sous forme de tableau pour des températures de 20 °C et de 4 °C. Des nomogrammes donnent la hauteur de migration en fonction du temps écoulé pour chaque type de sol et chaque température; des exemples décrivent la façon de s'en servir.

6 PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

6.1 Aperçu et objectifs

Le chapitre six des Enviroguides traite de la toxicité des produits chimiques vis-à-vis des milieux et vis-à-vis des espèces vivantes autres que l'homme. Une place prépondérante est accordée à la toxicité vis-à-vis de la vie aquatique, et cela reflète l'importance de cette toxicité dans les faits. L'introduction de substances toxiques dans les eaux entraîne souvent une pollution beaucoup plus durable que leur introduction dans l'atmosphère. Par ailleurs, la diffusion et le transport du polluant toxique atténuent beaucoup moins dans les eaux que dans l'atmosphère l'action toxique. Enfin, la bioconcentration en milieu aquatique s'est révélée une bien plus grande menace sur la plan de l'écologie que le même phénomène en milieu terrestre. Bien entendu, dans les cas où la pollution terrestre constituait une menace grave, elle a reçu l'attention qui s'imposait.

6.2 Sources d'information

Comme la pollution des eaux constitue une menace dont la gravité est admise, il existe pour beaucoup de substances des normes de qualité de l'environnement applicables aux eaux, ainsi que des normes de potabilité de l'eau de boisson. Les limites fixées par ces normes sont indiquées dans les Enviroguides à titre d'indications du danger que représentent certaines teneurs de l'eau en polluants. La réglementation relative aux teneurs en polluants de l'air ambiant est plus restreinte; cependant, lorsqu'une norme existait, elle a été signalée. Précisons que les teneurs limites de l'air ambiant fixées par les normes sont souvent établies avec l'idée de protéger la santé, ce qui n'est pas le cas des limites fixées par les normes de qualité de l'environnement applicables aux eaux.

Le *Registry of Toxic Effects of Chemical Substances* (RTECS) que publie le NIOSH donne les valeurs des seuils d'action toxique pour les espèces aquatiques. Ces valeurs indiquent un ordre de grandeur. Le paramètre utilisé est la tolérance limite moyenne pour 96 heures (TLm - 96 h), aussi appelée seuil d'action toxique létale moyen pour 96 heures. Dans le cas du styrène, par exemple, la TLm - 96 h correspond à une teneur que l'on situe entre 10 et 100 ppm. Il ne faut pas considérer la TLm - 96 h comme une limite en deçà de laquelle tout danger pour la vie aquatique est écarté; ce paramètre est cependant très utile pour déterminer par comparaison la toxicité relative d'une substance toxique.

d'où ces données sont extraites constituent un large éventail de publications traitant de l'environnement. Les principales sources secondaires ont été les publications de l'EPA, les *Water Quality Criteria* publiés par les différents États U.S. et l'*Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System*.

6.3 Choix et présentation des données

La présente section résume l'information recueillie dans les publications dépouillées, en ce qui concerne les effets sur l'environnement de la substance étudiée. Dans le cas de certaines substances, l'information accessible était énorme et seuls les éléments les plus récents ou les plus pertinents ont été retenus. D'autres substances, au contraire, ont fait l'objet de peu de travaux de recherche: l'information accessible est alors peu étendue, ne reflétant parfois le point de vue que d'un seul chercheur. Enfin, lorsque les auteurs n'ont trouvé rien qui ait été publié sur une substance, ils ont présenté des données sur des substances apparentées, chaque fois qu'ils ont jugé opportun de le faire.

Les données tirées soit de cas concrets de déversements (comportant une mortalité massive de poissons), soit d'essais toxicologiques en laboratoire, reflètent un large éventail de conditions relatives à la qualité de l'eau, l'oxygénation, la température, le pH, etc. Ces données expriment les variations dans les conditions d'exposition. Lorsque cela a été possible, les données représentatives des conditions extrêmes ainsi que des conditions normales ont été indiquées (les données extraites de la documentation publiée recevant priorité). Comme les travaux de recherche plus anciens font moins souvent état des conditions d'exposition, les auteurs ont privilégié les travaux les plus récents.

6.4 Glossaire

Les termes et concepts utilisés dans la présente section sont conformes dans l'ensemble à ce qu'on trouve dans la documentation. Les auteurs ont cru bon néanmoins de définir un certain nombre de termes techniques dont les définitions ne sont pas toujours bien établies. S'ajoute à cela un petit lexique français-latin et latin-français de noms d'espèces.

Notions

Bio-accumulation	Rétention sans cesse croissante d'une substance dans les tissus d'un organisme tout au long de son existence (le facteur de bioconcentration augmentant sans cesse).
Bio-amplification	Rétention d'une substance dans les tissus à des teneurs de plus

Demande biochimique en oxygène (DBO)	Mesure de la quantité d'oxygène utilisée dans l'oxydation biochimique de la matière organique durant un temps donné et à une température donnée; cette mesure n'est pas reliée aux besoins en oxygène de la combustion chimique; elle est déterminée entièrement par la disponibilité de la substance comme nourriture biologique et par la quantité d'oxygène utilisée par les micro-organismes durant l'oxydation; la DBO_5 est la DBO sur cinq jours; elle se mesure en kg d'oxygène par kg de substance.
Demande chimique d'oxygène (DCO)	Mesure de la quantité d'oxygène nécessaire pour consumer la substance; elle est mesurée par traitement avec des oxydants dans des conditions particulières.
Demande théorique d'oxygène	Demande d'oxygène nécessaire pour oxyder la substance en ses produits finals théoriques.
Dose létale 50 p. 100 (DL 50)	Dose qui tue, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Syn.: Dose létale moyenne.
DL 100; DL 0	Voir: Dose létale 50 p. 100.
Facteur de bioconcentration	Rapport de la teneur en une substance des tissus d'un organisme exposé (moins la teneur d'un organisme témoin) à la teneur en cette substance du milieu ambiant.
Organoleptique	Qualifie un caractère d'une substance perceptible par les organes des sens, en particulier le goût et l'odorat.
Teneur létale 50 p. 100 (TL 50)	Teneur à laquelle meurent, au bout d'un temps donné, 50 p. 100 des animaux auxquels on a fait absorber une certaine quantité de substance. Syn.: teneur létale moyenne.
TL 100; TL 0	Voir: Teneur létale 50 p. 100.
Tolérance limite moyenne pour 96 heures (TLm - 96 h)	Niveau de tolérance correspondant à la teneur à laquelle 50 p. 100 des sujets d'un test survivent après 96 heures d'exposition.

Espèces d'expérience

Nom vernaculaire	Nom scientifique
Abeille domestique	*Apis melliferra*
Ablette	*Alburnus alburnus*
Achigan à grande bouche	*Micropterus salmoides*
Algues	*Scenedesmus obliquus*
Algues vertes	*A. falcatus, Chlorella pyranoidosa, Chlorella vulgaris, Cladophora, Scenedesmus quadricauda*
Alose savoureuse	*Alosa sapidissima*
Anchois	*Stolephorus purpureus*

Bactéries	*E. coli, E. typhosa, Pseudomonas putida, P. fluorescens*
Balanes	*Eliminus modestus*
Bar rayé	*Morone saxatilis*
Barbote brune	*Ictalurus nebulosus*
Barbue de rivière	*Ictalurus punctatus*
Bigorneau	*Littorina* sp.
Blé	*Triticum aestivum*
Brème	*Abramis bramo*
Brochet maillé	*Esox* sp.
Capucette	*Menidia menidia*
Carassin	*Cyprinus carpio*
Carpe commune	*Cyprinus carpio*
Cératopogonidé	*Ceratopogonidae*
Champignons	*Aspergillus niger*
Chatte de l'est	*Notemigonus crysoleucas*
Chironomidé	*Chironomus plumosus*
Coque	*Cerastoderma edule*
Corégone	*Coregonus* sp.
Corise	*Corixidae*
Crabe	*Cancer franciscorum*
Crabe bleu	*Callinectes sapidus*
Crabe dormeur	*Cancer magister*
Crabes verts	*Carcinus maenas*
Crapaux commun	*Bufo bufo*
Crapet (commun)	*Lepomis humilis*
Crapet arlequin	*Lepomis machrochirus*
Crapet de roche	*Ambloplites rupestris*
Crapet vert	*Lepomis cyanellus*
Crapet-soleil	*Lepomis gibbosus*
Crevette	*Gammarus pulex*
Crevette	*Metapenaeus monoceros*
Crevette	*Palaemonetes kadiakensis, Crangon* sp., *Pandalus* sp.
Crevette grise	*Crangon crangon*
Crevettes	*Hippolyte zostericola, Palaemonetes pugio*
Cyanophycées	*Anabaena* sp., *Microcystis aeruginosa*
Cyprinontidé	*Oryzias latipes*
Daphnie	*Simocephalus* sp.
Demoiselle	*Zygoptera*
Diatomée	*Costatum*
Diatomée marine	*Nitzschia linearis*
Dorade	*Lagodon rhomboides*
Doré (*Pickerel*)	*Stizostedion vitreum*
Drosophile	*Drosophila melanogaster*

Faucheux	*Arachnida*
Fondule barré	*Fundulus diaphanus*
Fondulus hétéroclite	*Fundulus heteroclitus*
Fucus vésiculeux	*Fucus distichus, Fucus vesiculus*
Gambusie	*Gambusia affinis*
Gammare, crevettine	*Gammarus fasciatus*
Gardon	*Rutilus rutilus*
Gastropode	*Gastropoda*
Globicéphale	*Globicephela* sp.
Grand brochet	*Esox lucius*
Grenouille	*Salientia*
Grenouille léopard	*Rana pipiens*
Grenouille-taureau	*Rana catesbiana*
Hareng de l'Atlantique	*Clupea harengus*
Hareng du Pacifique	*Clupea pallasii*
Haricot commun	*Phasoelus vulgaris*
Hémiptère	*Hemiptera*
Homard américain	*Homarus americanus*
Huître américaine	*Crassostrea virginica*
Huître creuse	*Crassostrea gigas*
Huîtres	*Ostreidae*
Langouste du Japon	*Panulirus japonicus*
Limande sole	*Parophrys vetulus*
Loquette d'Amérique	*Macrozoarces americanus*
Méné	*Notropis lutrensis*
Méné bleu	*Notropis spilopterus*
Méné émeraude de rivière	*Notropis atherinoides*
Méné tête-de-mouton	*Cyprinodon variegatus*
Ménés	*Notropis* sp.
Morue commune	*Gadus morrhua*
Mouche domestique	*Musca domestica*
Moule bleue	*Mytilus edulis*
Moule commune	*Mytilus edulis*
Muge cabot	*Mugil cephalus*
Mulet à cornes	*Semolitus atromaculatus*
Mye	*Protothaca staminea*
Mye commune	*Mya arenaria*
Myside	*Mysidaceae*
Odonates	*Odonata*
Omble de fontaine	*Salvelinus fontinalis, Salmo trutta*
Ormeau	*Haliotis* sp.
Oursin	*Echinometra* sp., *Arbacid puntulata,*
Oursin pourpre	*Stronglo centrotus purpuratus*

Perle	*Claasenia sabulosa, Pteronarcela badia, Pteronarcys* sp., *Pteronarcys california*
Phryganes	*Stenonema* sp.
Phathelminthe	*Polycelis nigra*
Plie	*Pleusonectes platessa*
Plie canadienne	*Hyppoglossoidae*
Plie rouge	*Pseudopleuronectes americanus*
Poisson arc-en-ciel	*Lebistes reticulatus*
Poisson doré	*Carassius auratus*
Potamot	*Potamogeton*
Praire	*Mercenaria mercenaria*
Protozoaires	*Entosiphon sulcatum, Flagellate*
Puce d'eau	*Daphnia magna, Daphnia puplex*
Queue à tache noire	*Notropis hudsonius*
Rotifère	*Karetella cochlearis, Protozoa*
Sangsue	*Hirundinea*
Sargue	*Diplodus sargus*
Saumon atlantique	*Salmo salar*
Saumon coho	*Oncorhynchus kisutch*
Saumon nerka	*Oncorhynchus nerka*
Saumon quinnat	*Oncorhynchus tshawytscha*
Saumon-roi	*Oncorhynchus tshawytscha*
Souris de mer	*Agonus cataphractus*
Squalidé	*Squalius cephalus*
Tambour	*Micropogon undulatus*
Tanche	*Tinca tinca*
Tassergal	*Pomatomus saltatrix*
Tête-de-boule	*Pimephales promelas*
Truite arc-en-ciel	*Salmo gairdneri*
Truite fardée	*Salmo clarki*
Truite grise	*Salvelinus namaycush*
Vairon	*Phoxinus phoxinus*
Vandoise	*Leuciscus leuciscus*
Varech	*Macrocystis pyrifera*
Varech de l'Atlantique	*Laminaria digitata*
Ventre-pourri	*Pimephales notatus*
Ver	*Annelida, Nereis* sp.
Vivanneau	*Lutjanis* sp.

Nom scientifique	Nom vernaculaire
	Algues vertes

Ambloplites rupestris	
Anabaena sp., *Microcystis aeruginosa*	Cyanophycées
Anguilla anguilla, Anguilla vulgaris	Anguille d'Europe
Anguilla japonica	Anguille du Japon
Anguilla rostrata	Anguille d'Amérique
Annelida	*Annelide*
Annelida, Nereis sp.	*Ver*
Apis melliferra	*Abeille domestique*
Arachnida	Faucheux
Artemia salina	Artémia
Aspergillus niger	Champignons
Australorbis glabratus	Escargot
Bufo bufo	Crapaud commun
Calinectes sapidus	Crabe bleu
Cancer franciscorum	Crabe
Cancer magister	Crabe dormeur
Carassius auratus	Poisson doré
Carcinus maenas	Crabes verts
Cerastoderma edule	Coque
Ceratopogonidae	Cératopogonidé
Chironomus plumosus	Chironomidé
Claasenia sabulosa, Pteronarcella badia,	Perle
Pteronarcys sp., *Pteronarcys california*	
Clupea harengus	Hareng de l'Atlantique
Clupea pallasii	Hareng du Pacifique
Coregonus sp.	Corégone
Corixidae	Corise
Costatum	Diatomée
Crangon crangon	Crevette grise
Crassostrea gigas	Huître creuse
Crassostrea virginica	Huître américaine
Cyprinodon variegatus	Méné tête-de-mouton
Cyprinus carpio	Carassin
Cyprinus carpio	Carpe commune
Daphnia magna, Daphnia puplex	Puce d'eau
Diplodus sargus	Sargue
Drosophila melanogaster	Drosophile
E. Coli, E. typhosa, Pseudomonas putida	Bactéries
P. fluorescens	
Echinodermata	Étoile de mer
Echinoderma sp., *Arbacid punctulata*	Oursin
Eliminus modestus	Balanes
Engraulis mordax	Anchois du Pacifique
Entosiphon sulcatum, Flagellate	Protozoaires
Ephemerella subvaria	Éphémère

Gadus morrhua	Morue commune
Gambusia affinis	Gambusie
Gammarus fasciatus	Gammare, crevettine
Gammarus pulex	Crevette
Gasterosteus aculeatus	Épinoche à 3 épines
Gastropoda	Gastropode
Globicephela sp.	Globicéphale
Haliotis sp.	Ormeau
Hemiptera	Hémiptère
Hippoglossoidae	Plie canadienne
Hippolyte zostericola, Palaemonetes pugio	Crevettes
Hirundinea	Sangsue
Homarus americanus	Homard américain
Ictalurus nebulosus	Barbote brune
Ictalurus punctatus	Barbue de rivière
Karetella cochlearis, Protozoa	Rotifère
Lagodon rhomboides	Dorade
Laminaria digitata	Varech de l'Atlantique
Lebistes reticulatus	Poisson arc-en-ciel
kepidium sativum	Passerage cultivé
Lepomis cyanellus	Crapet vert
Lepomis gibbosus	Crapet-soleil
lepomis humilis	Crapet (commun)
Lepomis machrochirus	Crapet arlequin
Leuciscus leuciscus	Vandoise
Littorina sp.	Bigorneau
Lutjanis sp.	Vivanneau
Macrocystis pyrifera	Varech
Macrozoarces americanus	Loquette d'Amérique
Menidia, menidia	Capucette
Mercenaria mercenaria	Praire
Metapenaeus monoceros	Crevette
Micripogon undulatus	Tambour
Micropterus salmoides	Achigan à grande bouche
Morone saxatilis	Bar rayé
Mugil cephalus	Muge cabot
Musca domestica	Mouche domestique
Mya arenaria	Mye commune
Mysidaceae	Myside
Mytilus edulis	Moule bleue, moule commune
	Diatomée marine

Odonata	Odonates
Oncorhynchus kisutch	Saumon coho
Oncorhynchus nerka	Saumon nerka
Oncorhynchus tshawytscha	Saumon quinnat, saumon-roi
Oryzias latipes	Cyprinontidé
Osmerus sp.	Éperlan
Ostreidae	Huîtres
Palaemonetes kadiakensis, Crangon sp., *Pandalus* sp.	Crevette
Panulirus japonicus	Langouste du Japon
Parophrys vetulus	Limande sole
Pelecypoda	Pélécypode
Perca fluviatilis falavescens	Perche (perchaude)
Perca fluviatilis	Perche
Phasoelus vulgaris	Haricot commun
Phoxinus phoxinus	Vairon
Pimephales notatus	Ventre-pourri
Pimephales promelas	Tête-de-boule
Pleusonectes, platessa	Plie
Polycelis nigra	Plathelminthe
Pomatomus saltatrix	Tassergal
Porifera	Éponge
Potamogeton	Potamot
Prototheca staminea	Mye
Pseudopleuronectes americanus	Plie rouge
Pygosteus pungitius	Épinoche arctique
Rana catesbiana	Grenouille-taureau
Rana pipiens	Grenouille léopard
Rutilus rutilus	Gardon
Salientia	Grenouille
Salmo clarki	Truite fardée
Salmo gairdneri	Truite arc-en-ciel
Salmo salar	Saumon atlantique
Salvelinus fontinalis, Salmo trutta	Omble de fontaine
Salvelinus namaycush	Truite grise
Scenedesmus obliquus	Algues
Semolitus atromaculatus	Mulet à cornes
Simocephalus sp.	Daphnie
Squalius cephalus	Squalidé
Stenonema sp.	Phryganes
Stizostedion vitreum	Doré (*Pickerel*)
Stolephorus purpureus	Anchois
Stronglo centrotus purpuratus	Oursin pourpre
Tinca tinca	Tanche
Triticum aestivum	Blé
Venus mercenaria	Palourde américaine
Zygoptera	Demoiselle

7 PROTECTION DE LA SANTÉ

7.1 Aperçu et objectifs

Le chapitre sept des Enviroguides traite des effets sur la santé d'une exposition aux substances étudiées. Dans la plupart des cas, en plus des données sur la toxicité pour l'homme, on trouve des données sur la toxicité pour d'autres mammifères, les secondes aidant à l'interprétation des premières.

Afin d'obtenir une synthèse qui reflète fidèlement l'information publiée à ce jour, les auteurs ont puisé surtout dans les grands ouvrages de référence. Les données présentées portent sur les effets du contact avec la peau et les yeux ainsi que sur les effets de l'ingestion et de l'inhalation, ces voies d'absorption étant menacées lorsque des personnes sont présentes à proximité du lieu d'un déversement.

L'information fournie est d'ordre à la fois quantitatif et qualitatif. La section 7.1, intitulée *Limites d'exposition*, indique les teneurs (maximales) admissibles sur les lieux de travail fixées par les normes qu'établissent les gouvernements et les grands organismes. Les teneurs maximales admissibles se divisent en deux catégories: les valeurs moyennes pondérées par le temps d'exposition et les valeurs limites pour des expositions de courte durée.

Les sections 7.2 et 7.4 présentent les effets du contact avec les yeux, du contact avec la peau, de l'inhalation et de l'ingestion chez l'homme et chez les animaux pour certaines intensités et durées d'exposition.

La section 7.3 donne les valeurs des divers seuils gustatifs et olfactifs chez l'homme lorsque ces valeurs ont été trouvées dans la documentation consultée.

On trouve en 7.5 des énumérations des symptômes pour les quatre voies d'absorption. Enfin, la section 7.6 traite de la toxicité pour l'homme des produits de la combustion ou de la décomposition, en s'attachant surtout à l'examen des effets de l'intoxication aiguë.

7.2 Sources d'information

L'information présentée dans le chapitre sept est extraite en très grande partie de sources secondaires et tertiaires. Des publications ainsi que des sources d'information accessibles en direct ont été consultées. À cela s'ajoute une documentation variée provenant des gouvernements, des organismes non gouvernementaux, de l'industrie privée et des auteurs individuels. L'information extraite se retrouve dans les Enviroguides à l'état brut: elle n'a fait l'objet d'aucune vérification et n'a subi aucune correction. Il va de soi que seules les sources reconnues, et jugées fiables, ont été mises à profit.

7.3 Glossaire

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (TLV, 1981).
CL 50	Synonyme de TL 50. Voir *concentration* et *teneur*.
Concentration	Dans les ouvrages qui portent sur la pollution de l'air ou de l'eau, les termes *concentration* et *teneur* sont utilisés presque indifféremment. En ce qui concerne la collection "Enviroguide", les rédacteurs ont opté pour teneur (voir ce terme).
Concentration maximale	La concentration maximale se calcule sur 15 minutes consécutives (Québec, 1979).
Concentration moyenne	La concentration moyenne se calcule par des échantillonnages multiples ou continus d'une durée totale d'au moins 2 heures ou par 5 échantillonnages de la durée prescrite dans l'ouvrage visé à l'article 13 du présent règlement, lesdits échantillonnages étant répartis uniformément à l'intérieur d'une période de temps de 8 heures dans une journée de travail (Québec, 1979).
Contaminant	Polluant qui figure sur une liste de produits dangereux, établie en vertu de la Loi sur les contaminants de l'environnement.
DL 50	Dose létale 50 p. 100. - Dose calculée d'une substance, censée provoquer la mort de 50 p. 100 des individus au sein d'une population animale d'expérience normale et homogène. Elle est déterminée à la suite de l'absorption, excluant l'inhalation, d'une quantité de la substance par un nombre d'animaux statistiquement significatif provenant de cette population (RTECS, 1979).
DL min.	Dose létale minimale. - Dose la plus faible (autre que la DL 50) d'une substance dont l'absorption, excluant l'inhalation en une ou plusieurs prises, au bout d'un temps donné, a été signalée comme cause de la mort d'une personne ou d'un animal (RTECS, 1979).
DT min.	Dose toxique minimale. - Dose la plus faible d'une substance, introduite par toute autre voie que l'inhalation, pendant une période de temps donnée, dont l'absorption a été signalée comme cause d'effet toxique chez des personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les animaux ou les personnes (RTECS, 1979).
EPA TSCA	Environmental Protection Agency/Toxic Substances Control Act. (Remarque: les substances mentionnées dans l'inventaire de l'EPA TSCA comprennent les substances produites commercialement ou importées aux États-Unis; elles ont été ajoutées à l'inventaire conformément aux dispositions du Toxic Substances Control Act) (RTECS, 1979).

IDLH

Immediately Dangerous to Life or Health. - Teneur maximale à laquelle, après une exposition maximale de 30 minutes, il est possible à une personne de fuir une atmosphère polluée sans qu'il y ait apparition de signes fonctionnels d'intoxication, perturbation irréversible de la santé ou décès. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Immission

Transfert d'un polluant de l'atmosphère vers un "récepteur" qui peut être une personne, un animal, une plante. La teneur maximale d'immission, mentionnée au chapitre 7, se rapporte au polluant retenu dans les poumons. Il s'agit d'un concept d'origine allemande, adopté par l'ISO.

Indice d'odeur (I.O.)

Valeur sans dimension qui indique dans quelle mesure il est possible de percevoir une substance par son odeur; il s'agit du rapport de la force nécessaire pour introduire la substance dans l'air à la capacité de celle-ci de provoquer une réaction perceptible; on calcule cet indice de la façon suivante:

$$I.O. = 1315{,}12\,(P)(U.R.T.)^{-1}$$

où
- I.O. = indice d'odeur
- P = pression de vapeur (mm de Hg)
- U.R.T. = *Upper Recognition Threshold** (ppm)
- 1315,12 = facteur permettant de convertir en ppm la pression de vapeur exprimée en mm de Hg (AAR, 1981)

*Seuil supérieur d'identification de l'odeur.

MAK

Maximale Arbeidsplatz Konzentration. - Teneur maximale moyenne admissible sur les lieux de travail pour une exposition de 8 heures par jour et une semaine de 45 heures. Norme de la RFA.

MAK-D

Teneur maximale moyenne admissible sur les lieux de travail pour une exposition de 8 heures par jour et une semaine de 45 heures. Norme de la RDA.

MAK-K

Teneur maximale admissible sur les lieux de travail pour une période ne dépassant pas 30 minutes. Norme de la RDA.

NCI

National Cancer Institute (U.S.). - À noter que la sélection d'un produit chimique en vue d'essais biologiques n'implique pas qu'il s'agisse d'un cancérigène; il arrive également qu'un produit sélectionné soit retiré du programme d'expérimentation avant même le commencement des essais (RTECS, 1979).

NIOSH

National Institute for Occupational Safety and Health (U.S.).

PEL

Permissible Exposure Limit. - Teneur limite moyenne sur les lieux de travail pour une exposition d'une durée correspondant à une période de relève. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par le NIOSH.

Plafond

Valeur limite momentanée, c.-à-d. teneur à ne jamais dépasser. Exemple: *Threshold Limit Value - Ceiling* (TLV®-C).

Polluant	Agent physique, chimique ou biologique qui provoque une dégradation dans un milieu donné.
Seuil absolu de perception de l'odeur	Teneur à laquelle l'odeur de la substance est perçue par 50 p. 100 des membres du jury (AAR, 1981).
Seuil de perception de l'odeur	Teneur la plus faible de l'air en une substance permettant de percevoir ou d'identifier son odeur (AAR, 1981).
Seuil de perception de l'odeur par la population	Teneur à laquelle 50 p. 100 des membres de la population peuvent identifier et décrire l'odeur et comparer sa qualité à celle d'une autre odeur (AAR, 1981).
Seuil gustatif inférieur	Teneur la plus faible à laquelle la substance est perceptible au goût (AAR, 1981).
Seuil gustatif supérieur	Teneur à laquelle la substance est perceptible au goût par toute la population soumise à l'expérimentation (AAR, 1981).
Seuil gustatif 50 p. 100	Teneur à laquelle la substance est perceptible au goût par 50 p. 100 des membres du jury (AAR, 1981).
Seuil individuel de perception de l'odeur	Teneur minimale correspondant au stimulus olfactif nécessaire à l'éveil à la fois d'une première sensation, puis d'une autre identique lorsque le même stimulus est répété, chez un sujet (AAR, 1981).
Seuil supérieur d'identification de l'odeur	Teneur à laquelle l'odeur de la substance est identifiée par 100 p. 100 des membres du jury (AAR, 1981).
Seuil 50 p. 100 d'identification de l'odeur	Teneur à laquelle l'odeur de la substance est identifiée par 50 p. 100 des membres du jury (AAR, 1981).
STIL	*Short-term Inhalation Limit.* - Valeur limite pour une inhalation de courte durée (CHRIS, 1978).
Teneur	Quantité de matière solide, liquide ou gazeuse, rapportée à une masse ou à un volume d'autres matières dans lesquelles elle est en mélange, suspension ou dissolution.
TL 50	Teneur létale 50 p. 100. - Teneur calculée de l'air en une substance, censée provoquer, en un temps donné, la mort de 50 p. 100 des individus au sein d'une population animale d'expérience normale et homogène. Elle est déterminée à la suite de l'exposition à la substance d'un nombre statistiquement significatif d'animaux provenant de cette population (RTEC, 1979). Syn.: concentration létale 50 p. 100 (CL 50).
TL min.	Teneur létale minimale. - Teneur la plus faible (autre que la TL 50) de l'air en une substance dont l'absorption a été signalée comme cause de la mort d'une personne ou d'un animal (RTECS, 1979).

TLV•	*Threshold Limit Value.* - Valeur limite admissible sur les lieux de travail, établie et déterminée par l'ACGIH.
TLV•-C	*Threshold Limit Value - Ceiling.* - Voir *plafond.*
TLV• Skin	TLV• suivi de la mention "peau" a trait à la contribution possible à l'intoxication globale de l'absorption par voie cutanée (incluant les muqueuses et les yeux) par suite d'un contact avec la substance à l'état solide, liquide ou gazeux. La mention a pour but d'inciter à prendre des mesures préventives contre l'absorption cutanée de façon que la TLV• demeure valide (TLV, 1981).
TLV• STEL	*Threshold Limit Value - Short-term Exposure Limit.* - Teneur limite pour une exposition continue de courte durée sur les lieux de travail, qu'il est possible de tolérer sans souffrir d'irritation, de dommage irréversible aux tissus ou d'une narcose suffisamment grave pour accroître la probabilité de blessure par accident, diminuer la capacité de fuir ou réduire physiquement l'efficacité au travail, en prenant pour acquis que la TLV• - TWA quotidienne n'est pas dépassée.
TLV• - TWA	Valeur limite moyenne pondérée par le temps d'exposition sur les lieux de travail, en l'occurrence 8 heures par jour, 5 jours par semaine, pour laquelle aucun effet nocif n'est observé. Il s'agit d'une valeur définie et déterminée par l'ACGIH. Voir *PEL.*
TT min.	Teneur toxique minimale. - La plus faible teneur de l'air en une substance à laquelle des personnes ou des animaux ont été exposés, pendant une période de temps donnée, sans que l'absorption ait provoqué d'effet toxique chez les personnes ou d'effets carcinogènes, néoplastogènes ou tératogènes chez les personnes ou les animaux (RTECS, 1979).
TWA	*Time-weighted Average.* - Moyenne pondérée par le temps (d'exposition).
TWAEC	*Time-weighted Average Exposure Criteria.* - Teneur limite moyenne pondérée par le temps d'exposition sur les lieux de travail, en l'occurrence 40 heures par semaine, à laquelle peuvent être soumis quotidiennement sans subir d'effet néfaste, estime-t-on, la majorité des travailleurs (Ontario, 1981).
Valeur limite pour une exposition de courte durée	Durée maximale admissible d'exposition à une teneur maximale admissible de l'air en une substance donnée pour du personnel sans protection (CHRIS, 1978).

8 COMPATIBILITÉ CHIMIQUE

8.1 Aperçu et objectifs

Le chapitre huit des Enviroguides indique les réactions chimiques susceptibles de constituer des menaces additionnelles au cours d'un déversement accidentel. Certains exemples sont évidents (la chaleur et les explosifs, le feu et les combustibles), mais d'autres le sont moins. Au lieu de tenter d'évaluer la probabilité de réactions spécifiques dans des conditions bien précises, les auteurs ont présenté, sous forme de tableau, des exemples documentés illustrant la réactivité de chaque produit, dans le but de préparer une liste des réactions dangereuses connues, sous forme condensée et facile à consulter. Ainsi, il est possible de vérifier rapidement la réactivité de chacune des substances avec de nombreuses autres, et de prendre des mesures appropriées lorsqu'il y a un problème. Cette façon de faire ne fournit évidemment qu'un aperçu des risques à prévoir. Lorsque la prévision requiert plus de détails, il faut trouver d'autres renseignements dans les sources citées en référence ou auprès du fabricant du produit.

8.2 Sources d'information

Les données sur la compatibilité chimique proviennent en grande partie des sources suivantes: ***Handbook of Reactive Chemical Hazards*** de Bretherick, ***Fire Prevention Guide on Hazardous Wastes*** du National Fire Prevention Association et ***A Method for Determining the Compatibility of Hazardous Wastes*** (EPA 600/2-80-076). La réactivité avec les matériaux de fabrication du matériel de transport est traitée au chapitre quatre.

9 MESURES D'INTERVENTION ET DE SÉCURITÉ

9.1 Aperçu et objectifs

Dans un cas de déversement accidentel, les organismes d'intervention doivent se préoccuper tout à la fois de la santé, de la sécurité, de la propriété et de l'environnement, aussi bien dans la perspective d'une première intervention ou d'une urgence que dans la perspective d'une protection et de mesures à long terme. Chaque déversement constitue un cas particulier; il existe néanmoins des principes généraux, en matière d'intervention, qui valent pour tous les produits chimiques d'une catégorie donnée. Ce sont ces principes qui sont exposés dans le chapitre neuf des Enviroguides.

Souvent des conditions particulières font qu'une directive générale ne tient pas. Ainsi une température très élevée ou très basse peut changer radicalement le niveau de risque que présente le déversement d'une substance donnée, ce qui influera sur le choix des mesures et du matériel de lutte. Des vents trop forts ou un niveau d'eau trop élevé peuvent rendre contre-indiquée l'utilisation de certaines mesures de confinement. Les déversements de produits susceptibles de réagir entre eux peuvent entraîner des problèmes de nature imprévue. Au lieu d'essayer de décrire les mesures appropriées aux différentes situations, les auteurs ont mis l'accent sur la description des propriétés de la substance qui influent sur les modalités de l'intervention.

9.2 Sources d'information

Les données proviennent d'organismes d'intervention, d'experts industriels, d'associations industrielles et de la documentation sur les déversements. Lorsque des mesures particulières sont recommandées, elles sont tirées de la documentation.

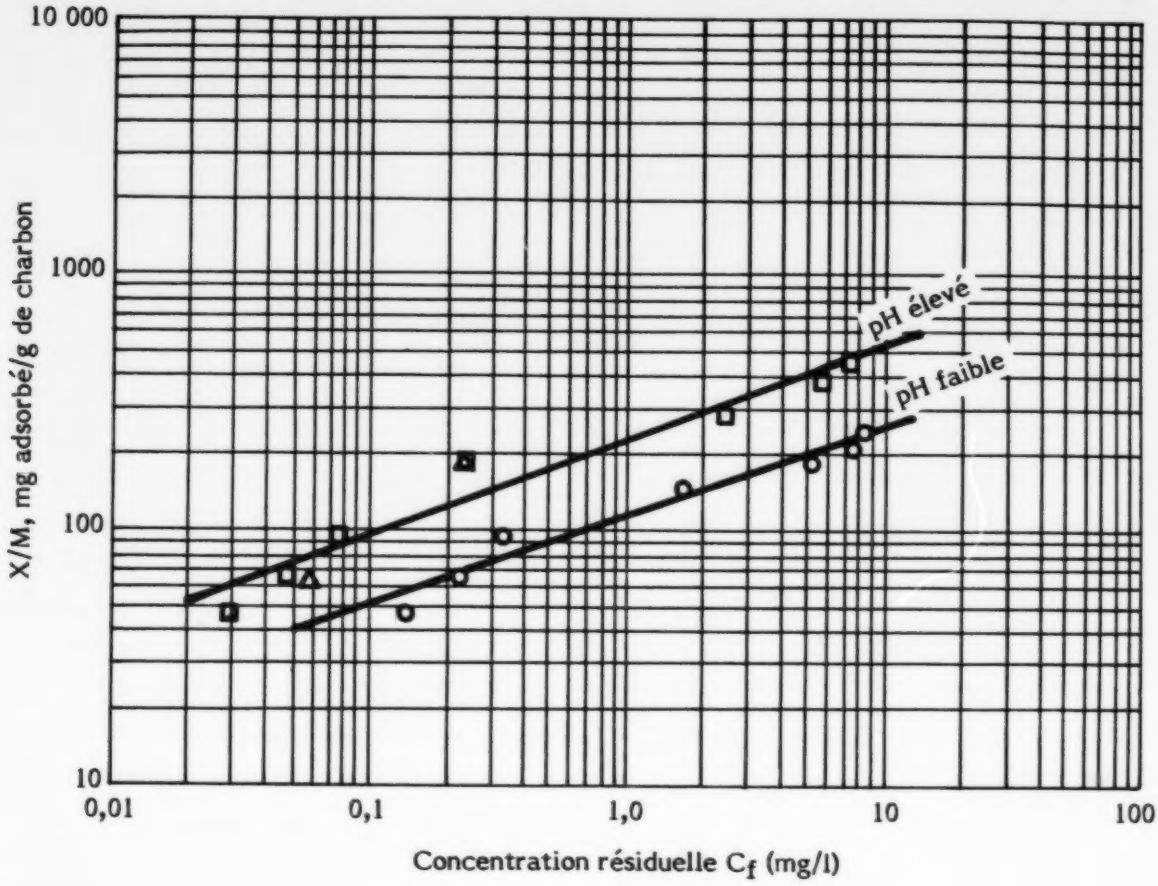
La section qui traite des moyens de protection est constituée d'extraits des ouvrages suivants: *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards* du NIOSH/OSHA, *Material Safety Data Sheets* de General Electric Company, *Information Sheets* du Oil and Hazardous Materials Technical Assistance Data System, *Data Sheets* du National Safety Council et *Étude des appareils respiratoires autonomes et des combinaisons entièrement étanches aux agents chimiques* (rapport EE-38) d'Environnement Canada.

9.3 Choix et présentation des données

9.3.1 Adsorption sur charbon. - Les auteurs ont reproduit telles quelles les recommandations concernant l'élimination de substances par adsorption sur du charbon actif. Ces recommandations sont basées sur l'efficacité d'élimination calculée à partir de données d'adsorption mesurées expérimentalement. La méthode générale de mesure consiste à utiliser

Figure 16

DICHLORHYDRATE DE BENZIDINE — COURBE D'ADSORPTION SUR DU CHARBON



Dose de charbon (mg/l)	○ pH = 3,0			□ pH = 7,0			△ pH = 9,0		
	C_f	$C_0 - C_f$ = X	X/M	C_f	$C_0 - C_f$ = X	X/M	C_f	$C_0 - C_f$ = X	X/M
0	9,99			9,78			9,78		
5	8,73	1,26	252	7,33	2,45	490	7,46	2,32	464
10	7,92	2,07	207	5,83	3,95	395	5,90	3,88	388
25	5,36	4,63	185	2,56	7,22	289	2,54	7,24	290
50	1,80	8,19	164	0,25	9,53	191	0,23	9,55	191
100	0,34	9,65	97	0,08	9,70	97	0,08	9,70	97
150	0,23	9,76	65	0,05	9,73	65	0,06	9,72	65
200	0,16	9,83	49	0,03	9,75	49			

différentes doses de charbon pour épurer de l'eau dont la teneur en polluants est connue, puis à comparer la teneur de l'eau épurée et celle de l'eau brute. Il faut utiliser un type de charbon et un tamis normalisés, ainsi que des temps de contact et des doses uniformes.

Le procédé d'adsorption en solution diluée est en général bien décrit par l'équation de Freundlich:

$$X/m = KC_f^{1/n} \quad (1)$$

où: $X = C_0 - C_f$ = quantité de composé adsorbé à partir d'un volume donné de solution

m = masse de charbon actif

C_0 = quantité de composé dans la solution non épurée

C_f = quantité de composé dans la solution épurée

K, 1/n = constantes empiriques, caractéristiques du composé et du charbon utilisé.

Comme l'équation l'indique, l'apport sur le charbon, X/m, est une fonction de la concentration à l'équilibre d'un composé organique après traitement au charbon. Si l'on trace X/m en fonction de C_f sur un papier logarithmique, K est la valeur de X/m lorsque $C_f = 1$, et 1/n est la pente de la droite. La courbe représentant l'adsorption du dichlorhydrate de benzidine illustre ce cas (figure 16).

Il est possible de réarranger l'équation de Freundlich pour calculer la dose nécessaire pour réduire d'une certaine valeur la concentration initiale du composé:

$$\frac{C_0 - C_f}{m} = KC_f^{1/n}. \quad (2)$$

On peut résoudre directement l'équation pour trouver la dose nécessaire, ou on peut réarranger l'équation sous forme logarithmique:

$$\log (C_0 - C_f) - \log m = \log K + 1/n \log C_f. \quad (3)$$

Par exemple, il est possible d'utiliser cette formule pour calculer la dose de charbon nécessaire pour diminuer la concentration de dichlorhydrate de benzidine de 10 mg/l à 0,1 mg/l, en se servant de la valeur des constantes utilisée dans le graphique précédent:

$K = 220$, $1/n = 0,37$

$\log (10-0,1) - \log m = \log 220 + 0,37 \log 0,1$

$m = 0,100$ g/l ou 100 mg/l.

On donne ci-après d'autres doses de charbon calculées en fonction de différentes variables:

	Paramètres de Freundlich		
	K = 110 1/n = 0,35		K = 220 1/n = 0,37
C_0 (mg/l)	pH = 3,0	Capacité d'adsorption (mg/g)	pH = 7 et 9
10	250		520
1,0	110		220
0,1	51		97
0,01	23		42

Doses de charbon nécessaires pour obtenir la concentration indiquée (données en mg/l pour un pH neutre)

Charbon en poudre; une seule étape				Colonne de charbon en grains	
	C_f (mg/l)			C_p (mg/l)	
C_0 (mg/l)	0,1	0,01	0,001	C_0 (mg/l)	Point ultime
1,0	9,4	24	58	1,0	4,5
0,1		2,2	5,7	0,1	1,0
0,01			0,52	0,01	0,2

D'après les doses de charbon mentionnées dans les tableaux, on voit l'avantage d'utiliser un traitement en plusieurs étapes. Dans le cas du dichlorhydrate de benzidine, il faut 100 mg/l de charbon actif pour diminuer la concentration initiale de 10 mg/l à 0,1 mg/l en une seule étape. Si l'on utilise deux étapes, c'est-à-dire réduction de 10 mg/l à 1,0 mg/l au cours de la première étape, puis réduction de 1,0 mg/l à 0,1 mg/l au cours de la deuxième étape, la dose totale est alors de 40 mg/l + 9,4 mg/l = 49,4 mg/l, soit environ la moitié de la dose requise dans le procédé à une seule étape.

On obtient le nombre ultime d'étapes en procédant par traitement sur colonne. Pour estimer les besoins en charbon granulaire, dans le cas d'un traitement sur colonne, calculer la capacité d'adsorption à partir de la courbe isotherme donnant la concentration du composé à éliminer. Cette capacité, désignée par $(X/m)C_0$, est la capacité ultime du charbon pour l'adsorbat à cette concentration (C_0). Cette capacité représente, pour une solution à un seul composé, l'adsorption ultime qu'il est possible d'atteindre durant le traitement sur une colonne

de charbon granulaire, si l'on fait fonctionner celle-ci jusqu'à ce que la concentration de l'adsorbat soit la même avant et après passage sur la colonne. Il est possible de calculer les besoins en charbon granulaire (G_C) à l'aide de l'équation suivante:

$$G_C = \frac{C_0}{(X/m)C_0} \qquad (4)$$

Si l'on utilise du charbon granulaire pour épurer une solution renfermant 1 mg/l de dichlorhydrate de benzidine (C_0 = 1,0 mg/l; X/m = 220 mg/g), l'équation 4 donne:

$$G_C = \frac{1}{220} = 0{,}0045 \text{ g/l, soit } 4{,}5 \text{ mg/l.}$$

Le charbon actif présente une large gamme d'efficacité d'adsorption pour les composés organiques. Les composés de faible masse moléculaire présentant des caractéristiques polaires sont faiblement sinon aucunement adsorbés. Les pesticides, les polychlorobiphényles, les hydrocarbures aromatiques polynucléaires, les phtalates, les composés aromatiques et les composés aromatiques substitués sont fortement adsorbés (EPA 600/8-80-023).

9.3.2 Mesures de protection. - Les mesures de protection mentionnées dans les sections traitant des mesures d'intervention sont recommandées pour les personnes travaillant dans la zone de dispersion du produit chimique; l'application de ces mesures ne signifie pas qu'on peut pénétrer dans cette zone sans aucun risque de contact ou d'inhalation. L'examen des données présentées peut aider à déterminer les mesures de protection à prendre dans un cas de déversement.

10 CAS CONCRETS DE DÉVERSEMENTS ACCIDENTELS

10.1 Aperçu et objectifs

Le chapitre dix des Enviroguides relate des cas concrets dont l'étude fournit une information utile à la prévision contre les déversements accidentels (préparation à l'avance de plans d'intervention). Les auteurs ont jugé que l'examen de ces cas a déjà contribué à l'avancement des connaissances en matière de prévision contre les déversements. Par ailleurs, ce ne sont pas le niveau de gravité du risque, ni la fréquence, ni le degré d'intérêt du public qui ont servi de critères dans le choix des cas, mais la valeur de l'information qu'il est possible d'en tirer à propos des techniques d'intervention et de leur efficacité. Les auteurs ont émis des commentaires, tiré des conclusions et formulé des recommandations lorsque cela a paru opportun.

10.2 Sources d'information

Les sources d'information consultées ont été les publications portant sur les matières dangereuses ou les déversements accidentels de produits chimiques, les reportages, les comptes rendus d'intervention et les communications entre les auteurs et les collecteurs de déchets de déversements ainsi que les organismes gouvernementaux canadiens et étatsuniens. Dans le cas de plusieurs produits chimiques, l'information qui existe sur les déversements survenus ne comporte rien à propos des techniques d'intervention et de nettoyage, de sorte que les Enviroguides traitant de ces produits n'offrent rien au chapitre de l'expérience acquise.

11 IDENTIFICATION ET DOSAGE DU POLLUANT

11.1 Aperçu et objectifs

Le chapitre onze des Enviroguides porte sur les méthodes d'analyse. Il présente les méthodes normalisées ou officiellement recommandées pour analyser chaque substance dans chaque milieu (air, eau et sol). L'abondance des détails reflète la volonté d'informer le lecteur sur l'équipement requis pour l'analyse de chaque substance. L'indication des limites de détection, des appellations, des matériaux de remplissage des colonnes chromatographiques, etc., sert à illustrer les exigences qu'il peut être nécessaire de satisfaire pour répondre aux besoins sur le terrain. On suppose que les échantillons d'air, d'eau et de sol sont prélevés au point de déversement, puis acheminés au laboratoire en vue d'être analysés.

Les méthodes présentées pour chaque milieu comportent des analyses à la fois quantitatives et qualitatives. Les méthodes qualitatives sont généralement plus rapides, plus faciles, moins sensibles et moins spécifiques et on les utilise pour déterminer la présence d'une substance. Les méthodes quantitatives sont plus précises et plus justes.

Certaines méthodes d'analyse utilisables sur le terrain existent déjà ou sont en cours d'élaboration, mais il n'en a pas été fait état en raison de leur nouveauté relative. Dans bien des cas, les méthodes et l'équipement changent rapidement; c'est pourquoi il est difficile de se documenter à ce sujet.

11.2 Sources d'information et choix des données

Les méthodes d'analyse pour chaque substance sont des méthodes normalisées ou des méthodes recommandées. Dans la mesure du possible, les auteurs ont indiqué les méthodes les plus simples, les plus fiables et les plus spécifiques. Ces méthodes peuvent être appliquées dans un laboratoire de chimie éloigné de l'endroit où s'est produit le déversement.

Les auteurs n'ont pas cherché à passer en revue toute la documentation ni à présenter des méthodes nécessitant des appareils perfectionnés comme ceux qui sont utilisés pour la recherche. Ils proposent d'abord la méthode fiable la plus simple, puis des méthodes plus complexes, mais aussi plus fiables et plus spécifiques.

11.3 Méthodes utilisées pour chaque milieu

11.3.1 Air. - Les méthodes d'analyse des produits présents dans l'air proviennent le plus souvent du National Institute for Occupational Safety and Health, de l'American Public Health Association et de l'Environmental Protection Agency (U.S.).

Les échantillons sont généralement prélevés en aspirant de l'air dans des solutions contenues dans des échantillonneurs de type impacteur, ou dans des tubes d'échantillonnage

remplis de carbone activé ou d'adsorbants poreux à base d'une résine polymère; on utilise aussi des sacs à échantillonnage pour gaz. Les échantillons sont analysés par différentes techniques spécifiques à la substance analysée.

11.3.2 Eau. - Les méthodes d'analyse des produits présents dans l'eau proviennent le plus souvent de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), de l'American Water Works Association (AWWA) et de l'Environmental Protection Agency (U.S.).

On prélève un échantillon représentatif d'eau, généralement un litre, dans un contenant approprié. On utilise ordinairement des contenants en plastique pour les produits inorganiques et des contenants en verre pour les produits organiques. Pendant le transport au laboratoire, les échantillons sont réfrigérés.

11.3.3 Sol. - Les méthodes d'analyse des produits présents dans le sol proviennent surtout de l'ASTM, de l'AWWA et de l'ouvrage intitulé *A Textbook of Soil Chemical Analysis* (Hesse, 1972).

On prélève des échantillons représentatifs de sol dans des contenants en verre ou en plastique selon les instructions de la méthode. Au laboratoire, les échantillons sont broyés jusqu'à la taille précisée dans la méthode, puis homogénéisés pour obtenir un échantillon représentatif. On utilise différentes méthodes d'analyse spécifiques au produit recherché.

11.4 Glossaire

Absorption, loi de Lambert — Si I_0 est l'intensité initiale du rayonnement incident et I l'intensité après passage de ce rayonnement à travers une épaisseur x d'une substance dont le coefficient d'absorption est k, $I = I_0 e^{-kx}$, alors l'absorption = $\log \frac{I}{I_0}$.

Analyse qualitative — Identification des constituants d'un produit sans tenir compte des teneurs.

Analyse quantitative — Détermination des teneurs d'un produit en différents constituants.

Blanc de réactifs — Solution ou mélange contenant tous les réactifs utilisés au cours d'une analyse; cette solution est traitée de la même manière qu'un échantillon, mais elle ne contient pas le composé à analyser; le blanc de réactifs permet d'apporter une correction de base aux résultats de l'analyse.

Carbowax — Nom de commerce de résines poreuses à base de polyéthylèneglycol et de méthoxy-polyéthylèneglycol; elles sont vendues en différentes masses moléculaires (p. ex. de 2×10^4 à 6×10^6) et sont utilisées comme revêtement du support de phase liquide en chromatographie gazeuse.

Colorimétrie	Méthode d'analyse basée sur l'absorbance d'une substance.
Conductimétrie	Technique de détection du point final pendant un titrage; elle est basée sur la mesure de la conductance de la solution ou sur la détermination de la concentration d'un analyte ionique par sa conductance.
Chromatographie	Méthode d'analyse en laboratoire permettant de séparer et d'identifier des produits chimiques dans des mélanges complexes; essentiellement, cette méthode comporte l'écoulement d'une phase mobile (gaz ou liquide) sur une phase stationnaire (qui peut être solide ou liquide). Au fur et à mesure que la phase mobile s'écoule sur la phase stationnaire, il y a adsorption et désorption répétées des constituants à une vitesse qui dépend principalement du rapport de distribution entre les deux phases. Si ce rapport est suffisamment élevé, les constituants du mélange se déplaceront à des vitesses différentes et se sépareront suivant une séquence caractéristique, appelée chromatogramme, qui permettra d'identifier chacun d'entre eux; la chromatographie en phase liquide, la chromatographie en phase gazeuse, la chromatographie sur papier, la chromatographie sur couche mince, la chromatographie d'échange d'ions et la chromatographie de perméation sur gel sont des variantes du même principe.
Chromatographie d'échange d'ions	Chromatographie où la phase stationnaire est constituée d'un produit échangeur d'ions (résine); les résines sont en général constituées d'une matrice de polystyrène sphérique réticulé avec du divinylbenzène, sur laquelle sont greffés des groupements fonctionnels comme l'acide sulfonique ou l'ammonium quaternaire (on utilise un détecteur à conductimétrie).
Chromosorb	Nom de commerce d'une série de produits constitués de diatomite particulaire, calcinée et calcinée au fondant; ils sont vendus en différentes granulométries; ils servent de support de phase stationnaire en chromatographie gaz-liquide.
Désorption	Élimination d'une substance de la surface sur laquelle elle est adsorbée; la désorption peut être réalisée par un ou plusieurs des procédés suivants: chauffage, diminution de la pression, déplacement par une substance plus fortement adsorbée ou dissolution par un solvant pour lequel la substance possède une plus grande affinité.
Détecteur à capture d'électrons	Détecteur utilisé en chromatographie gazeuse; les composés ayant un groupement électro-négatif ont tendance à capturer les électrons pour former des ions négatifs lorsqu'ils sont exposés à une source d'électrons de faible énergie; les ions négatifs sont entraînés dans le gaz vecteur, puis sont détectés par la réduction de courant qu'ils provoquent sur une électrode.

Détecteur à conductivité thermique	Détecteur utilisé en chromatographie gazeuse; il exploite le changement de conductivité thermique du gaz vecteur causé par la présence de la substance à analyser.
Détecteur à ionisation de flamme	Détecteur utilisé en chromatographie gazeuse; les composés organiques, quand ils sont pyrolysés dans une flamme d'hydrogène-air, produisent des espèces ioniques qui permettent au courant électrique de passer dans les gaz de combustion; on mesure le courant ionique qui est proportionnel à la teneur en composés organiques.
Digestion	En chimie analytique, procédé permettant d'effectuer un contact prolongé d'un mélange (généralement avec chauffage), pour atteindre l'équilibre complet d'une réaction ou d'un procédé physique; elle est utilisée pour "rendre complet" des procédés comme l'extraction, la cristallisation et l'adsorption; elle désigne souvent la dissolution ou l'extraction de matières particulaires (p. ex. des échantillons de sol ou des particules en suspension dans l'air) par la technique ci-dessus.
Impacteur	Échantillonneur contenant une solution absorbante à travers laquelle on fait barboter un courant d'air; les variantes permettant de prélever un faible volume d'échantillon dans un petit volume de liquide sont appelées mini-impacteurs.
Indice de Kovats	Indice de rétention relative, utilisé pour indiquer l'emplacement du pic d'un composé sur un chromatogramme gazeux, par rapport aux n-paraffines.
Molale (m)	Désigne la concentration d'une solution dont la quantité de soluté est donnée en moles et la quantité de solvant en kilogramme (c.-à-d. nombre de moles de soluté par kilogramme de solvant).
Molaire (*M*)	Désigne la concentration d'une solution dans laquelle une molécule-gramme (une mole) de substance est dissoute dans suffisamment de solvant pour obtenir 1 litre.
Normale (*N*)	Désigne la concentration d'une solution contenant un poids équivalent (masse moléculaire exprimée en grammes) dans 1 litre; par exemple, une solution d'acide nitrique 2 *N* (masse moléculaire = 63,0) renferme 2 x 63, soit 126 grammes, d'acide nitrique par litre.
PAGL	Phase d'acide gras libre. - Phase liquide appliquée sur le support solide en chromatographie gaz-liquide.
Spectromètre	Appareil qui disperse le rayonnement, puis qui enregistre le spectre résultant (p. ex. spectromètre d'émission, gamma, x, de masse).
Spectrométrie de masse	Méthode d'analyse chimique dans laquelle les ions produits par impact électronique ou par échange chimique sont séparés, identifiés et quantifiés selon leur masse. Les ions passent dans

	un champ magnétique ou électrostatique ou les deux; ils sont séparés en traversant ce champ à différentes vitesses.
Spectrophotomètre	Appareil permettant d'observer des spectres dans l'ultraviolet, le visible ou l'infrarouge et de calculer la concentration d'un produit en déterminant la quantité de lumière absorbée.
Temps de rétention	Temps nécesaire pour qu'un produit passe sur une colonne chromatographique et atteigne le détecteur.
Tenax GC	Produit de remplissage à base d'une résine linéaire poreuse, utilisée en chromatographie gazeuse; ce composé, qui est breveté, est de l'oxyde de poly-ρ-2, 6-diphénylphénylène; il est stable jusqu'à des températures dépassant 400 °C et il résiste à l'oxygène dans le gaz vecteur.
Titrage	Méthode volumétrique permettant de déterminer la concentration d'une substance en solution en ajoutant une solution étalon de volume et de concentration connus jusqu'à ce que la réaction soit terminée; le point final peut être déterminé visuellement par des méthodes colorimétriques ou électriquement par des méthodes potentiométriques, conductimétriques ou électrogravimétriques.
Triton	Nom de commerce d'agents tensio-actifs basés sur des alcools, des sulfonates et des sulfates de polyéthers alkylaryliques.
Verre fritté	Verre finement broyé, fritté pour former un produit céramique solide poreux; ce type de verre est utilisé pour filtrer les particules d'un flux liquide ou gazeux.

12 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

On trouve dans les Enviroguides deux formes de références bibliographiques: la référence incluse dans le texte, rendue par une abréviation entre parenthèses, et la référence intégrée à la liste bibliographique habituelle en fin d'ouvrage. L'inclusion dans le texte avec recours à l'abréviation permet au lecteur d'identifier la provenance de la plupart des données sans avoir à consulter la bibliographie.

La quasi-totalité de la documentation utilisée étant en langue anglaise, la liste ci-dessous est reproduite de l'édition anglaise.

Les lecteurs francophones trouveront à la fin du chapitre une seconde liste, très brève, constituée de quelques-uns des ouvrages qui ont servi à mettre au point la version française de la collection "Enviroguide".

12.1 Références bibliographiques

AAR 1981: BDM Corporation, The AAR Hazardous Materials Data Base, prepared for the Association of American Railroads, Parts I and II, McLean, VA (May, 1981).

APHA 1977: Katz, M. (ed.), Methods of Air Sampling and Analysis, second edition, American Public Health Association, Washington, DC (1977).

ASTM 1979: American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Part 31, Water, Philadelphia, PA (1979).

ASTM 1981: American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Part 26: Gaseous Fuels; Coal and Coke; Atmospheric Analysis, Philadelphia, PA (1981).

AWWA 1976: American Water Works Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 14th edition, American Public Health Association, Washington, DC (1976).

B.C. 1980: Workers' Compensation Board of British Columbia, Industrial Health and Safety Regulations, Workers' Compensation Act, Vancouver, British Columbia (July, 1980).

Bhirud 1978: Bhirud, V.L., "Saturated Liquid Densities of Normal Fluids", Aiche J., 24, pp. 1127-1131 (1978).

Blokker 1971: Blokker, P.C., "Migration of Oil in Soil", presented at International Conference, Antinguinamenta 71, Milan Fair of Anti-Pollution Equipment, Report No. 9171, Milan, Italy (November, 1971).

Booij 1979: Booij, C.G., "The Investigation into the Spreading and Dispersion of a Heavy Gas Cloud by Means of Plant Damages in the Affected Area", Proc. NATO/CCMS 10th ITM on Air Pollution Modelling and Its Application, Rome (October, 1979).

Castellan 1971: Castellan, G.W., Physical Chemistry, Addison Wesley Publishing Company, Don Mills, Ontario, p. 269 (1971).

Chemical Engineering 1975: Chemical Engineering, p. 75 (September 29, 1975).

CHRIS 1968: CHRIS Hazardous Chemicals Data M16465.12, CG-446-3, Department of Transportation, U.S. Coast Guard (October, 1968).

CHRIS 1974: CHRIS Hazard Assessment Handbook M16465.13, CG-446-3, U.S. Department of Transportation, U.S. Coast Guard (April, 1974).

CHRIS 1978: U.S. Department of Transportation, Coast Guard, Chemical Hazards Response Information System (CHRIS), Washington, DC (1978).

Eisenberg 1975: Eisenberg, N.A., C.J. Lynch, R.M. Kumar, R.J. Breedina and M.N. Durran, "A Critical Technical Review of Six Hazard Assessment Models", Enviro Control Inc., Rockville, MD, for U.S. Coast Guard, Washington, DC, AD-A035399 (December, 1975).

Environment Canada 1975: Canadian Wind Normals, Volume 3 (1975).

EPA 600/2-80-076: Hatayama, H.K., J.J. Chen, E.R. deVera, R.D. Stephens and D.L. Storm, A Method for Determining the Compatibility of Hazardous Wastes, Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH (April, 1980).

EPA 600/8-80-023: Dobbs, R.A. and J.M. Cohen, Carbon Adsorption Isotherms for Toxic Organics, U.S. Environmental Protection Agency, Waste Water Research Division, Municipal Environmental Research, Cincinnati, OH (April, 1978).

EPA 670/2-75-042: Pilie, R.J. et al., Methods to Treat, Control and Monitor Spilled Hazardous Materials, U.S. Environmental Protection Agency, National Environmental Research Center, Cincinnati, OH, EPA 670/2-75-042 (June, 1975).

Esso 1972: Esso Research Eng. Co., "Spills of LNG on Water - Vaporization and Downwind Drift of Combustible Mixtures", Report No. EEGIE-72 (1972).

Fannelop and Waldman 1972: Fannelop, T.K. and G.D. Waldman, "Dynamics of Oil Slicks", AIAA J., 10, pp. 506-510 (April, 1972).

Fishtine 1963: Fishtine, S.H., "Reliable Latent Heats of Vaporization", Indus. Eng. Chem., 55, p. 47 (1963).

Fleischer 1980: Fleischer, M.T., "Spills: An Evaporation/Air Dispersion Model for Chemical Spills on Land", Proceedings of the Nat'l Conf. on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, KY (1980).

Freeze and Cherry 1979: Freeze, R.A. and J.A. Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1979).

Hall 1974: Hall, D.J., C.F. Barrett, and M. Ralph, Experiments on a Model of an Escape of Heavy Gas, Report No. LR217 (AP), Warren Spring Laboratory, Stevenage, Herts, UK (1974).

Hesse 1972: Hesse, P.R., A Textbook of Soil Chemical Analysis, Chemical Publishing Co. Inc., New York, NY (1972).

ILO 1980: International Labour Office, Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, second (revised) edition, Geneva, Switzerland (1980).

Kistiakovskii 1921: Kistiakovskii, V.A., "Latent Heat of Vaporization", J. Russ. Phys. Chem. Soc., 53 (I), pp. 256-264 (1921).

Leinonen and McKay 1975: Leinonen, P.J. and D. McKay, "A Mathematical Model of Evaporation and Dissolution from Oil Spills on Ice, Land, Water and Under Ice", Proc. 10th Canadian Symposium on Water Pollution Research in Canada (1975).

Little 1981: Little, A.D., "Research and Development of Methods for Estimating Physicochemical Properties of Organic Compounds of Environmental Concerns", A.D. Little Inc., Part 2, pp. 14.8-14.10, 19.18-19.19 (1981).

Mackay and Matsugu 1973: Mackay, D. and R.S. Matsugu, "Evaporation Rate of Hydrocarbon Spills on Water and Land", Can. J. Chem. Eng., 51, pp. 434-439 (1973).

Masterton 1973: Masterton, W.L. and E.J. Slowinski, Chemical Principles, W.B. Sander Co., third edition, Philadelphia, PA (1973).

McQuaid 1979: McQuaid, J., Dispersion of Heavier-than-Air Gases in the Atmosphere: Review on Research and Progress Report on HSE Activities, Technical Paper 8, Health and Safety Executive, Sheffield, UK, 16 pp. (1979).

NIOSH Guide 1978: U.S. Department of Health, Education and Welfare, Pocket Guide to Chemical Hazards, U.S. Department of Health, Education, and Welfare, and U.S. Department of Labour, Washington, DC (1978).

Ontario 1981: Ontario Ministry of Labour, Exposure Criteria for Potentially Harmful Agents and Substances in Work Places, (FOR DISCUSSION ONLY), Standards and Programs Branch, Ministry of Labour, Toronto, Ontario (May, 1981).

Pasquill 1974: Pasquill, F., Atmospheric Diffusion, second edition, Ellis Harwood, 429 pp. (1974).

Perry and Chilton 1973: Perry, R.H. and C.H. Chilton, (eds.), Chemical Engineer's Handbook, fifth edition, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, NY (1973).

Quebec 1979: Cabinet du Lieutenant-Gouverneur, Gazette officielle du Québec: Partie 2, Lois et règlements, L'Éditeur officiel du Québec (Décembre, 1979).

Raj 1974: Raj, P.P.K. and A.S. Lakekar, Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook, U.S. Coast Guard Report No. CG-D-65-74 (1974).

Raj 1977: Raj, P.P.K. and P.M. O'Farrel, "Development of Additional Hazard Assessment Models", Arthur D. Little Inc., Cambridge, MA, for U.S. Coast Guard, Washington, DC, AD-A042365 (March, 1977).

Rausch 1977: Rausch, A.H., R.M. Kumar, and C.J. Lynch, A Critical Technical Review of Six Additional Hazard Assessment Models, U.S. Coast Guard Report No. CG-D-54-77 (1977).

Reid 1977: Reid, R.C., J.M. Prausnitz, and T.K. Sherwood, The Properties of Gases and Liquids, third edition, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, NY, pp. 16-21 (1977).

RTECS 1979: Lewis, R.J. and R.L. Tatken, Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, 1979, Vols. 1 and 2, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, OH (September, 1980).

Saskatchewan 1981: Saskatchewan Ministry of Labour, Occupational Health and General Regulations, Saskatchewan Labour, Occupational Health and Safety Branch, Regina, Saskatchewan (May, 1981).

Slade 1968: Slade, D. (ed.), Meteorology and Atomic Energy, U.S. Atomic Energy Commission, Division of Tech. Information, USHEC TID-24190, 445 pp. (1968).

Stiver and Mackay 1982: Stiver, W. and D. Mackay, Spill Technology Newsletter "Artificial Weathering of Crude Oils", (January-February, 1982).

TDB (online) 1981: Toxicity Data Base, Toxicology Information Online, available from the National Library of Medicine, Washington, DC (1981).

Thibodeaux 1979: Thibodeaux, L.J., Chemodynamics, Environmental Movement of Chemicals in Air, Water and Soil, John Wiley and Sons, New York, NY (1979).

Thomson 1959: Thomson, G.W., Techniques of Organic Chemistry, A. Weissberger (ed.), third edition, Vol. I, Part I, Interscience Publishers, New York, NY, p. 473 (1959).

TLV 1981: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, TLV®s Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment with Intended Changes for 1981, Cincinnati, OH (1981).

Turner 1970: Turner, D.B., Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, Public Health Service Publication No. 99-AP-26, U.S. Dept. of Health, Education and Welfare, 84 pp. (1970).

Watson 1943: Watson, K.M., "Thermodynamics of the Liquid State - Generalized Prediction of Properties", Indus. Eng. Chem., 35, p. 398 (1943).

Yaws 1974: Yaws, C.L., "Physical Properties", Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, NY, pp. 107-117, 215 (1974).

12.2 Choix d'ouvrages en langue française

AFNOR: Essais toxicologiques et écotoxicologiques des produits chimiques, Association française de normalisation, Paris, 1984. Recueil de normes présentées chacune en français et en anglais.

Castany, G. et J. Margat: Dictionnaire français d'hydrogéologie, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 1977. Index de termes anglais.

Charbonneau, J.-P. et coll.: Encyclopédie de l'écologie, Larousse, 1977.

Chovin, P. et A. Roussel: Physicochimie et physiopathologie des polluants atmosphériques, Masson, Paris, 1973.

CSST: Guide de sélection des appareils de protection respiratoire, Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec, Montréal, 1983.

Détrie, J.-P.: La pollution atmosphérique, Dunod, Paris, 1969.

Donadini, J.-C. et G. Donadini: Lexique technique des produits chimiques, Société des annuaires internationaux Rousset, 2 tomes et 1 supplément, Vincennes, 1978. Caractères physiques des corps, propriétés, utilisations, etc.

Duval, Clément et Raymonde Duval: Dictionnaire de la chimie et de ses applications, Technique et Documentation, 3e éd., Paris, 1978.

Gouvernement du Canada: Règlement concernant les marchandises dangereuses ainsi que la manutention, la demande de transport et le transport des marchandises dangereuses, Gazette du Canada, Ottawa, 6 fév. 1985. Texte anglais en regard du texte français.

Gouvernement du Québec: Dictionnaire anglais-français de la prévention des incendies, 1982. Définitions en français.

Lamy S.A.: Lamy transport, marchandises dangereuses, 12e éd., Paris, 1986.

Lauwerys, R.: Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles, Masson, 1982. La terminologie laisse parfois à désirer (nombreux anglicismes, p. ex.), mais l'ouvrage est une mine de renseignements.

Lemaire, Frans et Emmanuelle Lemaire: Dictionnaire de l'environnement, Marabout, Verviers, 1975.

Leynaud, G. et coll.: La pollution des eaux continentales, Gauthier-Villars, Paris, 1976.

Maës, Michel: Les résidus industriels, Technique et Documentation, 2 tomes, Paris, 1975.

Manuila et coll.: Dictionnaire français de médecine et de biologie, Masson, 20 fascicules, Paris, 1981.

Mathieu, J.-P. et coll.: Dictionnaire de physique, Masson-Eyrolles, Paris, 1985. Lexique anglais-français en annexe.

Médard, Louis: Les explosifs occasionnels, Technique et Documentation, 2 volumes, Paris, 1979.

OLF: Dictionnaire de l'eau, Éditeur officiel du Québec, Québec, 1981. Index des équivalents anglais.

Quinchon, Jean et coll.: La sécurité et l'hygiène du travail dans l'industrie des substances explosives, Technique et Documentation, Paris, 1980.

Ramade, François: Éléments d'écologie: écologie appliquée, McGraw-Hill, Paris, 1982. Il s'agit d'une 3e édition revue et augmentée d'Éléments d'écologie appliquée (1974).

Rodier, Jean: L'analyse de l'eau, Dunod, 2 tomes, 5e éd., Paris, 1976.

Ternisien, Jean et coll.: Dictionnaire usuel de l'environnement et de l'écologie, Guy Le Prat édition, 2 vol., Paris, 1981.

INDEX

A

Absorption, loi de Lambert 94
ACGIH XIII, 82
Adsorption sur charbon 87
Analyse qualitative 94
Analyse quantitative 94
Azéotrope 5

B

Bio-accumulation 73
Bio-amplification 73
Bioconcentration 73
Blanc de réactifs 94
Bouteilles 22

C

Camions-citernes 22
Capacité calorifique 5-6
Caractéristiques de combustion 6
Carbowax 94
Chaleur d'hydratation 6
Chaleur de combustion 6
Chaleur de cristallisation 6
Chaleur de décomposition 6
Chaleur de dilution 6
Chaleur de dissolution 6
Chaleur de formation 6
Chaleur de polymérisation 6
Chaleur de transition 6
Chaleur de vaporisation 6
Chaleur latente de fusion 6
Chaleur latente de sublimation 6
Chaleur spécifique 6
Charbon actif 87

Chromatographie 95
Chromatographie d'échange d'ions 95
Chromosorb 95
Citernes portables 22
CL 50 82
Coefficient de diffusion turbulente 63
Coefficient de dilatation thermique 6
Coefficient de partage octanol/eau 6
Coefficient de rugosité 63
Coefficient de transfert de masse de Mackay et Matsugu 40
Colorimétrie 95
Combustible 5
Commerce 21
Compatibilité chimique 86
Compatibilité chimique des matériaux de fabrication 23
Comportement au feu 6
Composition de la solution commerciale type 7
Concentration 82
Concentration de saturation 7
Concentration maximale 82
Concentration moyenne 82
Conditions météorologiques 42
Conditions normales 7
Conductimétrie 95
Conductivité électrique 7
Conductivité thermique 7
Constante de dissociation 7
Constante de la loi d'Henry 7
Constante diélectrique 7
Constante d'ionisation 7
Contaminant XI, 82
Corrélation de Watson 14

D
DBO 74
DCO 74

Débit d'émission de vapeurs 39-42
Débit d'étranglement 26
Délimitation de la zone dangereuse 43, 45, 46, 48
Demande théorique d'oxygène 74
Densité de vapeur 8
Densité relative 8
Désorption 95
Détecteur à capture d'électrons 95
Détecteur à conductivité thermique 96
Détecteur à ionisation de flamme 96
Déversement d'un liquide 25-26
Diagrammes de phases 11
Diffusion dans l'atmosphère 28
Diffusion dans l'eau 62
Diffusion horizontale 36
Diffusion verticale 37
Diffusivité 8
Digestion 96
Dilution 62
DL 50 XI, 74, 82
DL min. XI, 74, 82
Données relatives à l'inflammabilité et à la combustion 4-5
DT min. XI, 82

E
Écoulement en bloc 69
Énergie de Gibbs 8
Énergie libre de formation 8
Énergie réticulaire 8
Enthalpie 8
Entropie de formation 8
EPA TSCA 82
Épreuve au bloc de plomb 8
Équation d'Antoine sur la pression de vapeur 8, 13
Équation de Clapeyron 16, 20
Équation de Darcy 68

Équation d'Edminster 17-18
Équation de Fishtine 14, 16
Équation de Freundlich 89
Équation de Kistiakovskii 14
Équation de Stiver et Mackay 39
Espèces (lexique des noms) 74-80
Étalement d'un fluide 53
État d'un corps 8
Évaporation 39, 66
Expansion causée par la polymérisation 8
Explosibilité 8

F
Facteur de bioconcentration 74
Facteur de compressibilité 8
Facteur de conversion masse-volume 9
Fuite d'un gaz 26-27
Fûts 22

H
Hygroscopicité 9

I
IDLH XI, 83
Immission XI, 83
Impacteur 96
Incombustible 5
Indice de Kovats 96
Indice de réfraction 9
Indice d'odeur 83
Inflammabilité 9
Inflammable 4
Insoluble 5

L
Légèrement soluble 5
Limites d'inflammabilité 5

Limite inférieure d'explosion 9
Limite inférieure d'inflammabilité 9
Limite supérieure d'explosion 9
Limite supérieure d'inflammabilité 9
Loi de Darcy 68

M
MAK XII, 83
MAK-D XII, 83
MAK-K XII, 83
Masse atomique 9
Masse moléculaire (M) 9
Masse volumique (ρ) 9
Masse volumique apparente 9
Masse volumique de la vapeur saturante 9
Masse volumique des liquides 17
Mélange eutectique 9
Méthode d'additivité d'Immirzi et de Perini 19
Méthode de Bhirud 17
Migration dans le sous-sol 66
Miscible 5
Modèle de bouffée 38
Modèle de panache 34
Modèles de diffusion de vapeurs 31
Molaire (M) 96
Molale (m) 96
Moment dipolaire 9
Moyennement soluble 5

N
NCI 83
NIOSH XIII, 83
Nomogrammes applicables aux cours d'eau 62
Nomogrammes de conversion des unités 48-50
Nomogrammes de la diffusion des vapeurs 39
Nomogrammes des fuites 24

Nombre de Reynolds 26
Normale (*N*) 96

O
Organoleptique 74
Orifice 25
OSHA XIII

P
PAGL 96
Panache de Pasquill 33, 36, 37, 38
PEL XII, 83
Plafond 83
Plage de distillation 9
Point d'ébullition 9
Point d'éclair 9
Point de congélation 10
Point d'écoulement 10
Point de fusion 10
Point d'inflammation 10
Point source théorique 35
Point triple 10
Poissons (liste des noms d'espèces) (76)
Polluant XII, 84
Potentiel d'ionisation 10
Pression critique 12
Pression de vapeur (P_V) 10

R
Rapport des capacités calorifiques 10
Rayon de la nappe de produit déversé 53, 56, 67
Rayon hydraulique 63
Réactions 86
Règle de Thompson 14
Résistivité 10
Risque de retour de flamme 10

S
Santé 81
Sensibilité aux chocs 10
Seuil absolu de perception de l'odeur 84
Seuil de perception de l'odeur 84
Seuil de perception de l'odeur par la population 84
Seuil gustatif inférieur 84
Seuil gustatif supérieur 84
Seuil gustatif 50 p. 100 84
Seuil individuel de perception de l'odeur 84
Seuil supérieur d'identification de l'odeur 84
Seuil 50 p. 100 d'identification de l'odeur 84
Solubilité 5, 10
Soluble 5
Spectromètre 96
Spectrométrie de masse 96
Spectrophotomètre 97
Stabilité de l'atmosphère 30
STEL XII
STIL 84

T
Taux d'évaporation 10
Température critique 10
Température de décomposition 10
Température de déflagration 10
Température de détonation 10
Température de la flamme 10
Température de polymérisation 10
Température de sublimation 10
Température de transition 11
Température d'inflammation spontanée 10
Temps de chute 57, 59
Temps de rétention 97
Tenax 97
Teneur XII, 84

Teneur de saturation 7
Tension interfaciale 11
Tension superficielle 11
Tension superficielle à l'interface liquide-air 11
Tension superficielle à l'interface liquide-eau 11
Titrage 97
TL 50 XII, 74, 84
TLm XIII, 72, 74
TL min. XII, 74, 84
TLV® XII, 43, 85
TLV®-C XIII, 85
TLV Skin 85
TLV-STEL 85
TLV-TWA 85
TT min. 85
TWA 85
TWAEC 85
Transport 21
Très soluble 5
Triton 97

V
Valeur limite pour une exposition de courte durée 85
Verre fritté 97
Viscosité 11
Vitesse de chute 58
Vitesse de combustion 11
Vitesse de détonation 11
Vitesse de frottement 63
Vitesse de la flamme 11
Vitesse limite de chute 59
Volume molaire 11

W
Wagons-citernes 22